

IB 131-2015/023

**Optimierung der roboterbasierten
Feinbesäumung von Kohlenstofffaserpreforms
im endkonturnahen Preformingprozess**

Christoph Hagedorn

Björn Reinhard, Sven Torstrick



**Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik
Braunschweig**

08 / 2015

IB 131-2015/023

**Optimierung der roboterbasierten Feinbesäumung von
Kohlenstofffaserpreforms im endkonturnahen
Preformingprozess**

Braunschweig, 08.2015

Der Bericht umfasst:

52 Seiten

Institutsleiter:
Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann



Leiter der Abteilung:
Name des stellvert. Abteilungsleiters:

Verfasser:
Christoph Hagedorn



Verbundprozesstechnologie
Christian Krombholz





Bachelorarbeit

Christoph Hagedorn

Optimierung der roboterbasierten Feinbesäumung von Kohlefaserpreforms im endkonturnahen Preformingprozess

Christoph Hagedorn

**Optimierung der roboterbasierten
Feinbesäumung von Kohlefaserpreforms
im endkonturnahen Preformingprozess**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau, Energie und Anlagenbau
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP)
Ottenbecker Damm 12
21684 Stade

Erstprüfer/in: Prof. Dr.-Ing- Dietmar Pähler
Zweitprüfer/in : Sven Torstrick

Abgabedatum: 17.08.2015

Thema der Bachelorthesis

Optimierung der roboterbasierten Feinbesäumung von Kohlefaserpreforms im endkonturnahen Preformingprozess

Stichworte

Ultraschall, Schneiden, Messer, Kohlenstofffaser, Preform, Optimierung

Kurzzusammenfassung

Steigende Treibstoffpreise und ein stärkeres Umweltbewusstsein zwingen moderne Flugzeug- und Automobilhersteller dazu leichtere Werkstoffe, wie beispielsweise Faserverbundkunststoffe einzusetzen. Mit den heutigen Herstellungsverfahren kann der steigende Bedarf an Faserverbundkunststoffen jedoch nicht gedeckt werden.

Am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in Stade wird aufgrund dessen an der Großserienfertigung von komplexen RTM-Bauteilen aus Kohlenfaserkunststoff geforscht. Um dem Fertigungsziel von hunderttausend produzierten Bauteilen pro Jahr gerecht zu werden, läuft der Herstellungsprozess voll automatisiert ab.

Diese Arbeit betrachtet dabei den Prozessschritt der Feinbesäumung eines Preforms vor der Harzinjektion in einer RTM-Großserienfertigung. Ziel ist es, die Feinbesäumung zu optimieren. Dazu werden die Prozessparameter beim Besäumen identifiziert und anschließend in Schneidversuchen untersucht. Ein auftretendes Problem in der Feinbesäumung ist die fehlerhafte Lage des Preforms, hierzu werden Lösungswege aufgezeigt und umgesetzt.

Title of the paper

Optimization of a Robot-Assisted Finetrimming of Carbon Fiber Preforms in a Near Net Shape Preformingprocess.

Keywords

Ultrasonic, Trimming, Blade, Carbon Fiber, Optimization,

Abstract

As a result of the increasing fuel prices and the growing environmental awareness, modern aircraft and automobile industry are being forced to use lighter materials such as composites. The growing demand of composites can't be covered with the production methods by today's standards.

The German Aerospace Center in Stade conducts research on the large-scale production of complex carbon-fiber-reinforced plastic RTM-Parts. The manufacturing process is automated in order to reach the goal of one hundred thousand parts per year.

This bachelor thesis considers the process step of the finetrimming of a preform before the resin injection. The aim is to optimize the finetrimming. For this purpose, the process parameters are identified during trimming and then examined in cutting tests. A problem which arises in the finetrimmingprocess is the faulty position of the preforms, therefor solutions are displayed and implemented.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis.....	v
Abkürzungsverzeichnis.....	v
Abbildungsverzeichnis.....	vi
Tabellenverzeichnis.....	viii
1 Einleitung.....	1
2 Theoretische Grundlagen.....	3
2.1 Faserverbundkunststoffe.....	3
2.2 Kohlenstofffaser.....	3
3 Stand der Technik.....	6
3.1 Projekt EVo.....	6
3.2 Feinbesäumung des Preforms.....	9
3.2.1 Roboter und Endeffektor.....	10
3.2.2 Programmierung des Feinbesäumungsroboters.....	11
3.2.3 Schneiden mit ultraschallangeregter Klinge.....	12
3.2.4 Laserlichtschnittverfahren.....	15
3.3 Bewertung der Schnittkantenqualität.....	16
4 Schwachstellen des Feinbesäumungsprozess und Optimierungsansätze.....	19
5 Schneidversuche.....	21
5.1 Probenauswahl und Vorbereitung.....	21
5.2 Konstruktion eines Schneidtisches.....	22
5.3 Versuchsaufbau.....	23
5.4 Allgemeine Versuchsdurchführung am Schneidtisch.....	24
5.5 Allgemeines Vorgehen bei der Qualitätsauswertung.....	25
5.6 Versuch: Schneidwinkel.....	27
5.6.1 Vorgehen bei der Schneidwinkeluntersuchung.....	27
5.6.2 Auswertung der Schneidwinkeluntersuchung.....	27
5.7 Versuch: Vorschubgeschwindigkeit.....	30
5.7.1 Vorgehen bei der Vorschubgeschwindigkeitsuntersuchung.....	30
5.7.2 Auswertung der Vorschubgeschwindigkeitsuntersuchung.....	30
5.8 Ursache des Schnittkantenversatzes der er obersten Faserlage zur eigentlichen Schnittkante.....	33

5.9	<i>Ungeschnittene und fehlerhafte Fasern am Schnittanfang</i>	33
5.10	<i>Versuch: Ultraschallamplitude</i>	34
5.10.1	<i>Vorgehen bei der Ultraschallamplitudenuntersuchung</i>	34
5.10.2	<i>Auswertung der Ultraschallamplitudenuntersuchung</i>	34
5.11	<i>Versuch: Übertragung der Schnittergebnisse auf triaxiale und unidirektionale Gelege</i>	36
5.11.1	<i>Vorgehen bei Schneidversuchen an triaxialen und unidirektionalen Gelegen</i>	36
5.11.2	<i>Auswertung der Schnittversuche an triaxialen und unidirektionalen Gelegen</i>	36
5.12	<i>Verifizierung der Ergebnisse auf ein anderes Schwingersystem und verschiedene Messer</i>	39
6	Anwendung der Schneidergebnisse auf den Feinbesäumungsprozess	41
7	Flächige Preformfixierung auf dem Feinbesäumungswerkzeug	44
7.1	<i>Konstruktiver Entwurf und Umsetzung einer Andrückrolle</i>	44
7.2	<i>Überprüfung der Lage des Preform-Innenflansches durch einen Laserlichtschnittsensor</i>	46
8	Zusammenfassung und Ausblick	48
9	Literaturverzeichnis	49
10	Anhang	51

Symbolverzeichnis

α	[°]	Sonotrodenanstellwinkel
β	[°]	Keilwinkel
γ	[°]	Spitzenwinkel
Λ	[°]	Schneidwinkel
B	[mm]	Basisabstand
d	[mm]	Objektentfernung
f	[Hz]	Frequenz
s_{max}	[mm]	Amplitude
\vec{v}_c	[mm/s]	Schnittgeschwindigkeit
\vec{v}_f	[mm/s]	Vorschubgeschwindigkeit
\vec{v}_s	[mm/s]	Schwinggeschwindigkeit

Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer - aided design
CCD	Charge-coupled device
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
EVo	Endkonturnahe Volumenbauteile
FA	Faserverbundleichtbau und Adaptronik
FVK	Faserverbundkunststoffe
MAG	Multiaxialgelege
RTM	Resin Transfer Moulding
TCP	Tool Center Point
UD	Unidirektional Gelege
ZLP	Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Materialmix des Boeing 787-Dreamliner [3]	1
Abbildung 2: Roboterbasierter Feinbesäumungsprozess am ZLP	2
Abbildung 3: Verschiedene Typen von textilen Halbzeugen, a [10], b [11], c [7]	4
Abbildung 4: CAD Modell der EVo Anlage	6
Abbildung 5: Produzierter Flugzeugspant im EVo-Projekt	7
Abbildung 6: Preforminganlage [5]	8
Abbildung 7: Prozessablauf des RTM-Verfahrens [12]	9
Abbildung 8: Werkzeuge am Endeffektor des Roboters	10
Abbildung 9: Feinbesäumungszelle in der Offlineprogrammierung	11
Abbildung 10: Vektorielle Darstellung der Schnittgeschwindigkeit	12
Abbildung 11: Veranschaulichung der Berechnung von v_s	12
Abbildung 12: Einfluss des Schneidwinkels Λ auf den Keilwinkel β	14
Abbildung 13: Schematischer Aufbau einer Ultraschallschneidanlage	14
Abbildung 14: Umgekehrter piezoelektrischer Effekt [18]	15
Abbildung 15: Vereinfachte Darstellung des Laserlichtschnittverfahrens [19]	16
Abbildung 16: 2D Laserlichtschnittmessung [20]	16
Abbildung 17: Messsystem von der Firma Apodius GmbH [21]	17
Abbildung 18: Vergleich der Faserorientierung durch die <i>Apodius Vision Sensorik</i> [21] 18	
Abbildung 19: Digitalmikroskop der Firma Dino Lite	18
Abbildung 20: Ausfransungen der Schnittkanten	19
Abbildung 21: Fehlerhafte Lage des Preforms auf dem Feinbesäumungswerkzeug ...	19
Abbildung 22: Programmablauf beim Schneidversuch	22
Abbildung 23: Entwurf des Schneidtisches	23
Abbildung 24: Versuchsaufbau	24
Abbildung 25: Editieren der Amplitude und Vorschubgeschwindigkeit	24
Abbildung 26: Messpunkte des Versuchspreforms	26

Abbildung 27: Verlauf der Faserorientierung über die Länge des Preforms	26
Abbildung 28: Prinzip zur Ermittlung der Schnittqualität nach dem Trennen.....	27
Abbildung 29: Geschnittene Preforms und deren Verschnitt.....	28
Abbildung 30: Starke Ausfransungen bei 45° im Vergleich zu 30°	28
Abbildung 31: Einfluss des Schneidwinkels auf die Faserabweichung	29
Abbildung 32: Einfluss des Schneidwinkels auf den Schnittkantenversatz	29
Abbildung 33: Schnittkanten bei (v.l.n.r.) 140mm/s, 300mm/s und 400mm/s.....	31
Abbildung 34: Zerstörung der Faserorientierung bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 30mm/s im Schnittanfang.....	31
Abbildung 35: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Faserwinkelabweichung	32
Abbildung 36: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf den Schnittkantenversatz...	32
Abbildung 37: Faserverschiebung durch das Schneidmesser als Ursache für den Kantenversatz	33
Abbildung 38: Fehlerbild am Schnittanfang in der untersten Faserlage	34
Abbildung 39: Ungeschnittene Gelege-Lagen bei einer Amplitude von 50%	35
Abbildung 40: Ausfransungen am Schnittende der 90° Faser.....	36
Abbildung 41: Vergleich der Triax-Preform Schnittversuche (l. +45°/90°/-45°, r. - 45°/0°/+45°).....	37
Abbildung 42: Schnittergebnis eines 0° Unidirektional-Preforms	38
Abbildung 43: Faserwinkelabweichung in Abhängigkeit des Spitzenwinkels	39
Abbildung 44: Versatz der Schnittkante in Abhängigkeit des Spitzenwinkels.....	40
Abbildung 45: Schneidstrategie am EVo Spant	41
Abbildung 46: Tangentiale Schneidbahn in den Radien am inneren Flansch	42
Abbildung 47: Kollisionsgefahr zwischen Endeffektor und Werkzeugaufnahme	43
Abbildung 48: Überprüfung der Erreichbarkeit der Andrückrolle	45
Abbildung 49: Montierte Andrückrolle.....	45
Abbildung 50: Scan-Bereiche	46
Abbildung 51: Preformlage am inneren (links) und äußerem (rechts) Flansch.....	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Typische Eigenschaften von Kohlenstofffasern (modifiziert nach [8]).....	4
Tabelle 2: Konsolidierparameter für die Versuchsproben	21
Tabelle 3: Zuordnung der Spannungswerte zur Amplitudenhöhe	25
Tabelle 4: Ergebnisse der Amplitudeneinstellung	35
Tabelle 5: Versuchskonfiguration mit unterschiedlichen Messern und Schneidsonotrode	39
Tabelle 6: Schneidablaufplan am EVo-Spant	41

1 Einleitung

Faserverstärkte Kunststoffe haben sich heutzutage in der industriellen Anwendung weitestgehend als Hochleistungsmaterialien etabliert. Zu den Anwendungsbereichen dieser Werkstoffgruppe zählen neben der Luft- und Raumfahrt auch die Bereiche Automobilbau, Windenergie und Sportartikel. Vorteile der Faserverbundkunststoffe liegen vor allem in deren gewichtsspezifisch hohen Festigkeit und Steifigkeit, wodurch diese Materialien, insbesondere im Leichtbau, Anwendung finden. Besonders in der Luftfahrt wird aus ökonomischen Gründen immer häufiger auf Faserverbundkunststoffe als Werkstoff gesetzt. Die attraktive Gewichtsreduzierung des Flugzeuges bedeutet einen geringeren Treibstoffverbrauch und somit automatisch weniger Kosten und CO₂-Emissionen. Bei neueren Modellen der namenhaften Flugzeughersteller wie Boeing (Boeing 787 - Dreamliner) und Airbus (A350 XWB) liegt der Anteil an Faserverbundwerkstoffen bei 50%, siehe Abbildung 1. [1] [2]

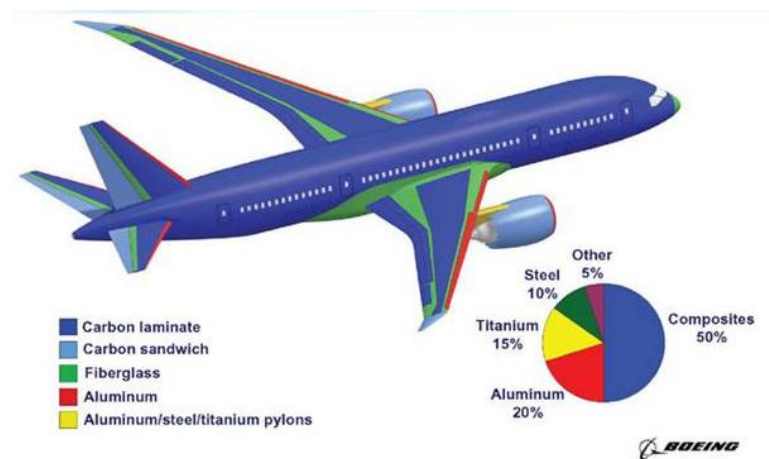


Abbildung 1: Materialmix des Boeing 787-Dreamliner [3]

Im Vergleich zu konventionellen Werkstoffen besteht, hinsichtlich der Produktions- und Materialkosten von Faserverbundwerkstoffen, noch ein erheblicher Entwicklungsbedarf. Der limitierende Faktor sind die hohen Zykluszeiten der Großserienherstellung, die aus der teuren und personalaufwendigen Handfertigung resultiert. Eine Senkung der Fertigungskosten und Erhöhung der Produktionsrate kann somit nur durch einen höheren Automatisierungsgrad realisiert werden. [1] [2] [4]

Das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (FA) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) beschäftigt sich seit mehreren Jahrzehnten mit der ganzheitlichen Betrachtung von Faserverbundstrukturen – vom Rohstoff bis hin zum fertigen Bauteil. Mit der Gründung des Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) in Stade und der Abteilung für Verbundprozesstechnologie wird darüber hinaus seit 2010 die Schnittstelle zwischen prototypennaher Grundlagenentwicklung und industriellem Serieneinsatz geschlossen. Eine der am Standort Stade vorliegenden Großanlagen dient der vollautomatisierten Fertigung von komplexen RTM-Bauteilen (Resin Transfer Moulding) aus Faserverbundwerkstoffen. Die Anlage beinhaltet Bereiche zur Bereitstellung textiler Zuschnitte zur Herstellung eines endkonturnahen textilen Vorformlings, dem sogenannten Preform sowie einen Bereich zur Durchführung der Harzinjektion. Der in der vorliegenden Arbeit relevante Bereich des Preformings besteht aus der optischen Zuschnittserkennung, der Drapierung, der Konsolidierung, der Wirbelstromprüfung und der abschließenden Feinbesäumung von Gelegen oder Geweben aus Hochleistungstextilien. [5] [6]

Mithilfe der in Abbildung 2 dargestellten roboterbasierten Feinbesäumung können die noch nicht mit Harz infiltrierten Preforms an den Rändern mithilfe einer Ultraschallklinge beschnitten werden. Dieser Prozess ist notwendig, da die einzeln übereinander drapierten Faserlagen hinsichtlich der Konturgenauigkeit nicht im Toleranzbereich der Luftfahrtindustrie liegen. Diese Unregelmäßigkeit an den Rändern würde bei der Injektion zu ungleichmäßigen Faservolumengehalten und somit zu lokalen Schwachstellen führen.



Abbildung 2: Roboterbasierter Feinbesäumungsprozess am ZLP

Aus diesem Grund stellt die Feinbesäumung eine wichtige Schnittstellenfunktion zwischen dem Preformaufbau und der Injektion dar. Der Feinbesäumungsprozess wurde in der Gesamtanlage erfolgreich implementiert und erste Schneidergebnisse versprechen großes Anwendungspotenzial des Ultraschallschneidens. Momentan ist der Einfluss der Schneidparameter auf den Prozess noch nicht ausreichend evaluiert und die flächige Fixierung des Prefoms auf dem Werkzeug wurde als Schwachstelle des Prozesses identifiziert. Im Rahmen dieser Arbeit soll nun der vorliegende Feinbesäumungsprozess durch Schneidversuche analysiert und Lösungsvorschläge zur Behebung der identifizierten Schwachstellen erarbeitet werden.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel soll dem Leser die für diese Arbeit relevanten theoretischen Grundlagen über Faserverbundkunststoffe, vor allem aus Kohlenstofffasern, vermittelt werden. Dazu werden Details zu den verwendeten Materialien und Herstellungsprozessen erläutert.

2.1 Faserverbundkunststoffe

Werkstoffe, die aus mindestens zwei verschiedenen Komponenten mit unterschiedlichen Funktionen bestehen, werden als Verbundwerkstoffe bezeichnet [7]. Durch die Kombination von Faser und Matrix werden die vorteilhaften Eigenschaften der Materialien zu einem anisotropen Werkstoff verknüpft. Das bedeutet, dass die Werkstoffeigenschaften von der Faserrichtung abhängig sind. Hierbei sind die Festigkeiten in Faserrichtung besser als quer zur Faser. Aufgrund ihrer hohen Zugfestigkeit, hohen E-Moduls und geringen Dehnung stellen die Faserstoffe die verstärkende und lasttragende Komponente dar und bestimmen maßgebend die mechanischen Eigenschaften im Faserverbundkunststoff. Es wird deshalb auch von Verstärkungsfasern gesprochen. [4]

Neben den hohen mechanischen Eigenschaften, weisen Verstärkungsfasern eine sehr geringe Dichte von durchschnittlich unter 3g/cm^3 auf. Die bedeutendsten Verstärkungsfasern im FVK Bereich sind Glas-, Kohlestoff- (Carbon-) und Aramidfaserstoffe. [4]

Die Faser wird von einer Matrix umhüllt, dessen Aufgabe es ist, die Faser vor äußeren Einflüssen zu schützen sowie die Belastung quer zur Faserrichtung aufzunehmen. Im Faserverbundkunststoff werden duroplastische und thermoplastische Kunststoffe als Matrix verwendet [8].

Da im vorliegenden Anwendungsfall des Spantes ein duroplastisches Harz verwendet wird, wird im Folgenden darauf näher eingegangen.

Duroplastische Werkstoffe werden in Harzgruppen unterteilt, wobei am häufigsten Polyester, Epoxid- oder Phenolharz verwendet werden. Duroplasten entstehen bei einer irreversiblen chemischen Vernetzungsreaktion. Dies hat zur Folge, dass die Bauteilgeometrie nach dem Aushärten des Harzes nicht mehr verändert und das Harz nicht wie bei thermoplastischen Werkstoffen wieder aufgeschmolzen werden kann. Die vorteilhaften Eigenschaften eines duroplastischen Kunststoffes sind eine hohe Steifigkeit, chemische und thermische Beständigkeit, eine geringe Kriechneigung sowie Viskosität. Für die Verarbeitung von CFK im Luft- und Raumfahrtbereich, besonders im Strukturbau, werden aus den genannten Vorteilen überwiegend Epoxidmatrixsysteme verwendet.

Diese Arbeit bezieht sich auf die Feinbesäumung von Kohlenstofffaserpreforms, sodass im Folgenden auf diese Verstärkungsfasern näher eingegangen wird.

2.2 Kohlenstofffaser

Kohlenstofffasern, auch Carbonfasern genannt, finden hauptsächlich Anwendung für hochbelastete Strukturen in der Luft- und Raumfahrtindustrie. Auch die Automobilbranche sowie einige Sportartikelhersteller setzen bei Bauteilen vermehrt auf kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe.

Kohlestofffasern sind aus kohlenstoffhaltigen Ausgangsmaterialien wie Cellulose, Polyacrylnitril (PAN) und Pech hergestellt. PAN hat heutzutage den größten Marktanteil mit

86%, gefolgt von Cellulose mit 11% und Pech mit 4%. Sie werden mittels einer thermochemischen Spaltung organischer Verbindungen bei hohen Temperaturen von 500 bis 900 °C, in graphitartig angeordneten Kohlenstoff umgewandelt. Dieser Prozess wird als Pyrolyse bezeichnet. [7]

Das Erzeugnis ist ein hochfester und hochmoduliger Werkstoff. Diese hervorragenden Werkstoffeigenschaften spiegeln sich jedoch in dem recht hohen Materialpreis von etwa 120€/kg wieder. Bei Kohlenstofffasern wird zwischen verschiedenen Fasertypen unterschieden, die sich jeweils auf eine bestimmte Materialeigenschaft beziehen: HT (high tenacity/hohe Festigkeit), HST (high strain and tenacity/hohe Dehnung und Festigkeit), IM (intermediate modulus/mittlere Steifigkeit) und HM (high modulus/hohe Steifigkeit), siehe Tabelle 1. Weitere Eigenschaften von Kohlenstofffaser sind ein chemisch inertes Verhalten, elektrische Leitfähigkeit, thermische Stabilität, Biokompatibilität und Durchlässigkeit für Röntgenstrahlen. [7] [8] [9]

Tabelle 1: Typische Eigenschaften von Kohlenstofffasern (modifiziert nach [8])

Kennwerte	Einheiten	Kohlenstofffaser			
		HT	HST	IM	HM
Zugfestigkeit	GPa	2,7-3,5	3,9-7,0	3,4-5,9	2,0-3,2
E-Modul	GPa	228-238	230-270	280-400	350-490
Bruchdehnung	%	1,2-1,4	1,7-2,4	1,1-1,9	0,4-0,8
Spez. Zugfestigkeit	GPa*cm ³ /g	1,5-2,0	2,2-3,0	2,0-3,1	1,1-1,7
Spez. E-Modul	GPa*cm ³ /g	127-134	127-150	160-200	190-260
Filamentdurchmesser	µm	7-8	5-7	5-7	6,5-8,0
Dichte	g/cm ³	1,75-1,8	1,78-1,83	1,73-1,8	1,79-1,91
Therm.Ausdeh.koeff	10 ⁻⁶ /K	-0,1 - -0,7		-----	-0,5 - -1,3

Fasern liegen nach dem Herstellungsprozess in Form von Rovings vor. Als Roving wird ein Filamentstrang aus parallel verlaufenden Endlofsfasern bezeichnet [7]. Gängige Größen von Rovings sind 1K, 2K, 3K, 6K, 12K und 24K, dabei steht die Einheit K für 1000 einzelne Fasern.

Im Faserverbundwerkstoffbereich ist es gängig die Rovings zu Faserhalbzeugen weiter zu verarbeiten. Faserhalbzeuge sind flächige oder dreidimensionale Faserstrukturen, welche trocken oder bereits mit Harz imprägniert (sog. Prepregs) vorkommen. In Abbildung 3 sind die gängigsten Faserhalbzeuge, Geflechte, Gewebe und Gelege aus dem Faserverbundbereich dargestellt.

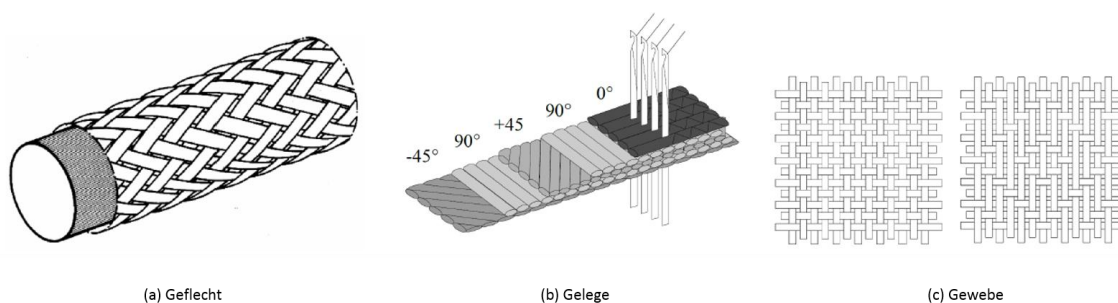


Abbildung 3: Verschiedene Typen von textilen Halbzeugen, a [10], b [11], c [7]

Geflechte werden nach DIN 60000 als Erzeugnisse aus Flechtfäden mit regelmäßiger Fadendichte und geschlossenem Warenbild, deren Flechtfäden diagonal zur Produktionsrichtung verlaufen, definiert. [4]

Gelege sind ein- oder mehrlagige textile Strukturen, welche aus nicht gewebten Fäden bestehen. Hierbei besteht die Möglichkeit, die Faserorientierung der einzelnen Faserlagen, zu variieren. Typische Gelegetypen sind Unidirektionalgelege (UD), bei denen die Faser nur eine Orientierung vorweist sowie Biaxialgelege (Biax) oder Triaxialgelege (Triax), bei denen die Faser zwei oder drei verschiedene Orientierungen hat. Dabei sind Biaxial- und Triaxialgelege der Gruppe der Multiaxialgelege (MAG) zugeordnet, da das Gelege mehr als nur eine Faserorientierung vorweist. Desweiterem können die einzelnen Faserschichten sich auch in der Fadenfeinheit unterscheiden sowie Faservliese, Beschichtungen und andere Materialien integriert sein. [7]

Gewebe entstehen durch das rechtwinkelige Verkreuzen von Rovings, welches aus Abbildung 3 ersichtlich wird. Die gängigsten Gewebetypen sind Atlas-, Köper- und Leinwandbindung. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Anzahl, der beim Weben übersprungenen Fäden, welches auch als Fadenflottierung bezeichnet wird. [7]

3 Stand der Technik

Um dem Leser mit dem Stand der Technik vertraut zu machen, beschäftigt sich dieses Kapitel mit der Prozesskette der EVO Anlage, dabei wird der für diese Arbeit relevante Bereich der Feinbesäumung genauer erläutert.

3.1 Projekt EVO

Die Produktionsstraße EVO (Endkonturnaher Volumenbauteile) stellt eine Produktionskette zur Herstellung von Bauteilen aus kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen mit hohen Bauteilraten dar und ist in Abbildung 4 als Modellansicht dargestellt. Die Besonderheit dieser Anlage ist, dass Bauteile produziert werden, bei denen jegliche Art von Nachbearbeitung wie etwa das Fräsen oder Wasserstrahlschneiden der Bauteilkanten entfällt. Das Projekt EVO beinhaltet die Entwicklung und Inbetriebnahme einer geeigneten Produktionsstraße, in der ein Bauteil endkonturnah gefertigt werden kann, wobei der gesamte Produktionsprozess vom Zuschneiden des benötigten Faserhalbzeugs bis hin zur Aushärtung der Bauteile abgebildet wird. Projektziel ist es, eine hocheffiziente Anlage mit einer Stückzahl von 100000 Bauteilen pro Jahr für die Massenproduktion von CFK-Bauteilen in der Luftfahrt- sowie Automobilindustrie zu schaffen. Das bedeutet eine Produktionszeit von 5,2 Minuten pro Bauteil.

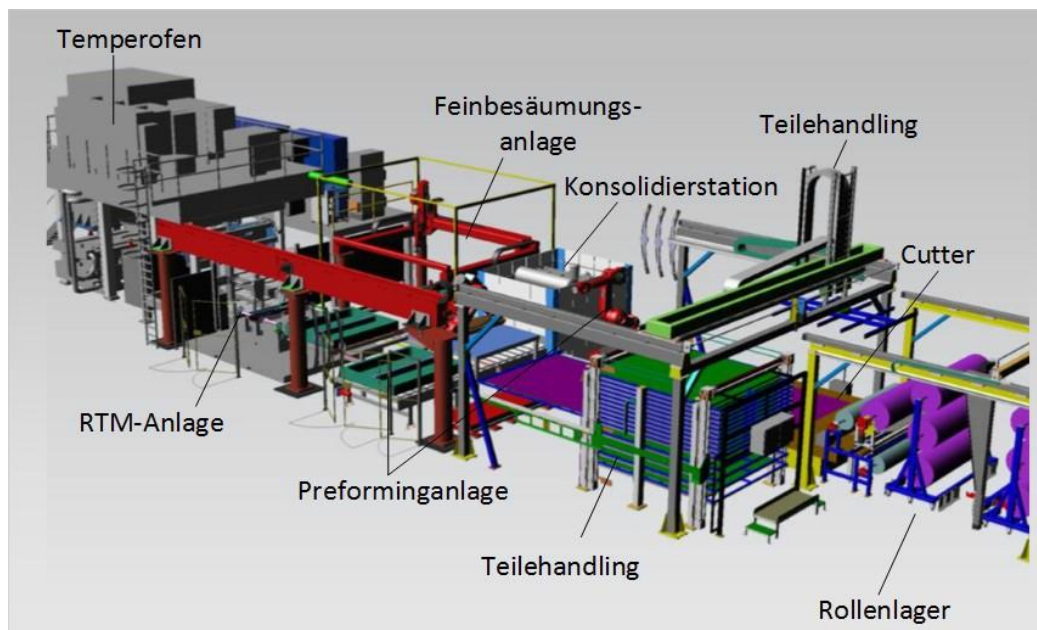


Abbildung 4: CAD Modell der EVO Anlage

Das in der Anlage beispielhaft hergestellte Bauteil ist ein Flugzeugspant, der in einer ähnlichen Form zum Beispiel im Rumpf eines möglichen Airbus A320 Nachfolger zum Einsatz kommen könnte. Die Besonderheit dieses Spants ist, wie in Abbildung 5 zu sehen, seine komplexe Geometrie. Die Bogenlänge des Außenflansches beträgt etwa 2000mm und weist ab dem Bereich der Aufdickung, auf der linken Seite des Spantes, eine Radiusänderung von 1200mm bis 3000mm auf. Die Stegbreite variiert zudem zwischen 80mm und 113mm und die inneren und äußeren Flanschbreiten haben mit 28mm über die Bauteillänge eine konstante Breite. Der Spant ist schichtweise aus Multiaxial- und Unidirektionallegen aufgebaut. [5]

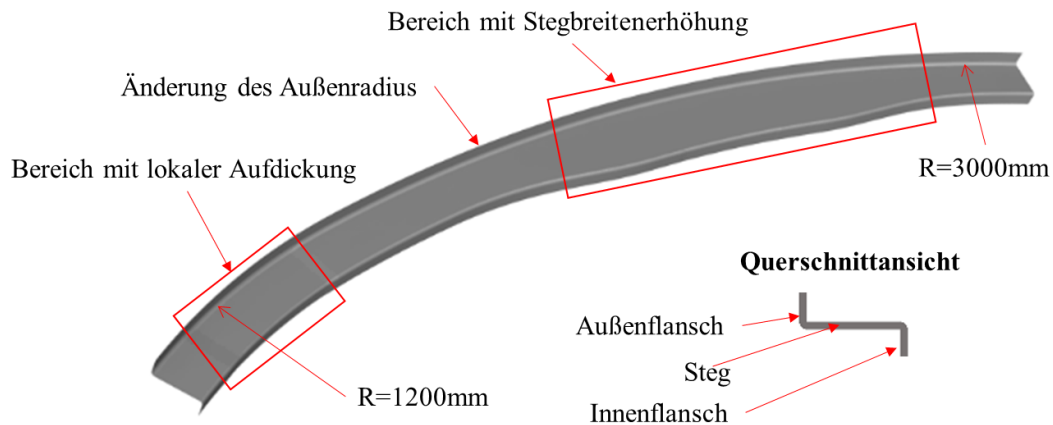


Abbildung 5: Produzierter Flugzeugspant im EVo-Projekt

Die gesamte EVo Anlage erstreckt sich über eine Fläche von 45 x 10m und kann, wie oben dargestellt, in drei wesentliche Arbeitsbereiche unterteilt werden: Der *Materialbereitstellung*, der *Preforminganlage* und der *RTM-Anlage*.

Im Bereich der *Materialbereitstellung* wird das benötigte CFK Halbzeug aus dem Rollenlager dem Cutter zugeführt. Der Cutter schneidet die gewünschten Formzuschnitte aus den Materialbahnen. Nach dem Zuschneiden werden die Zuschnitte von einem Portalgreifer abgesammelt und in einem Schubladenlager abgelegt. Werden Zuschnitte für den nächsten Prozess benötigt, so werden diese durch den Portalgreifer wieder aus dem Lager entnommen und auf den Übergabetisch abgelegt. Der Übergabetisch bildet die Schnittstelle zwischen der *Materialbereitstellung* und der *Preforminganlage*.

Die in Abbildung 6 dargestellte *Preforminganlage* produziert den Preform für RTM-Anlage.

Als Preform beziehungsweise Vorformling wird eine zwei- oder dreidimensionale, trockene Textilstruktur bezeichnet, welche aus einer oder mehreren Textilagen besteht. Dabei bildet die textile Verstärkungsstruktur bereits die Bauteilgeometrie ab und sichert eine belastungsgerechte Faseranordnung. [7]

Die auf dem Übergabetisch abgelegten Zuschnitte werden durch ein optisches Erkennungssystem lokalisiert und vom Drapierroboter aufgenommen. Dieser transportiert die einzelnen Zuschnitte zum Drapierwerkzeug, wo diese in ihre dreidimensionale Endgeometrie umgeformt werden. Nach dem Stapeln mehrerer Zuschnitte auf dem Drapierwerkzeug wird der daraus entstandene Preform zum Konsolidierwerkzeug übersetzt.

Um ein Handling des Preforms nach der Drapierung zu ermöglichen, sind die einzelnen Lagen mit einem zur Polymermatrix kompatiblen Binder bestückt. Dieser Binder nimmt 3-7 Gewichtsprozent des Bauteils ein und wird durch Wärmezufuhr aktiviert [7] [4].

Das Konsolidierwerkzeug fährt danach unter dem Drapierwerkzeug in die Konsolidierstation, wo der bis dahin aufgebaute Preform unter Druck und Temperatur gepresst wird. Der fertig konsolidierte Preform wird anschließend durch einen Verkettungsroboter in das Feinbesäumungswerkzeug gesetzt. Das Feinbesäumungswerkzeug ist auf einem beweglichen Werkzeuggestisch montiert und wird mit diesem in die Feinbesäumungszelle gefahren. Ein auf ein Portalroboter montiertes Ultraschallmesser besäumt den Preform auf die Endkontur. Bei der Feinbesäumung wird

der Preform durch Unterdruck auf dem Werkzeug fixiert, welcher mit einem Seitenkanalverdichter erzeugt wird. Des Weiteren verfügt das Feinbesäumungswerkzeug über eine Schneidnut, welche die äußere Geometrie des endkonturnahen Preforms abbildet. In der Schneidnut liegt ein fließartiges Nutmaterial, welches als Schneidauflage fungiert. Das Nutmaterial ist außerdem luftdurchlässig, damit auch im Nutbereich die Ansaugfunktion gegeben ist. Nach dem Schneiden wird der endkonturnaher Preform auf dem Feinbesäumungswerkzeug ausgefördert und vom Verkettungsroboter in das RTM-Werkzeug gelegt. [5]

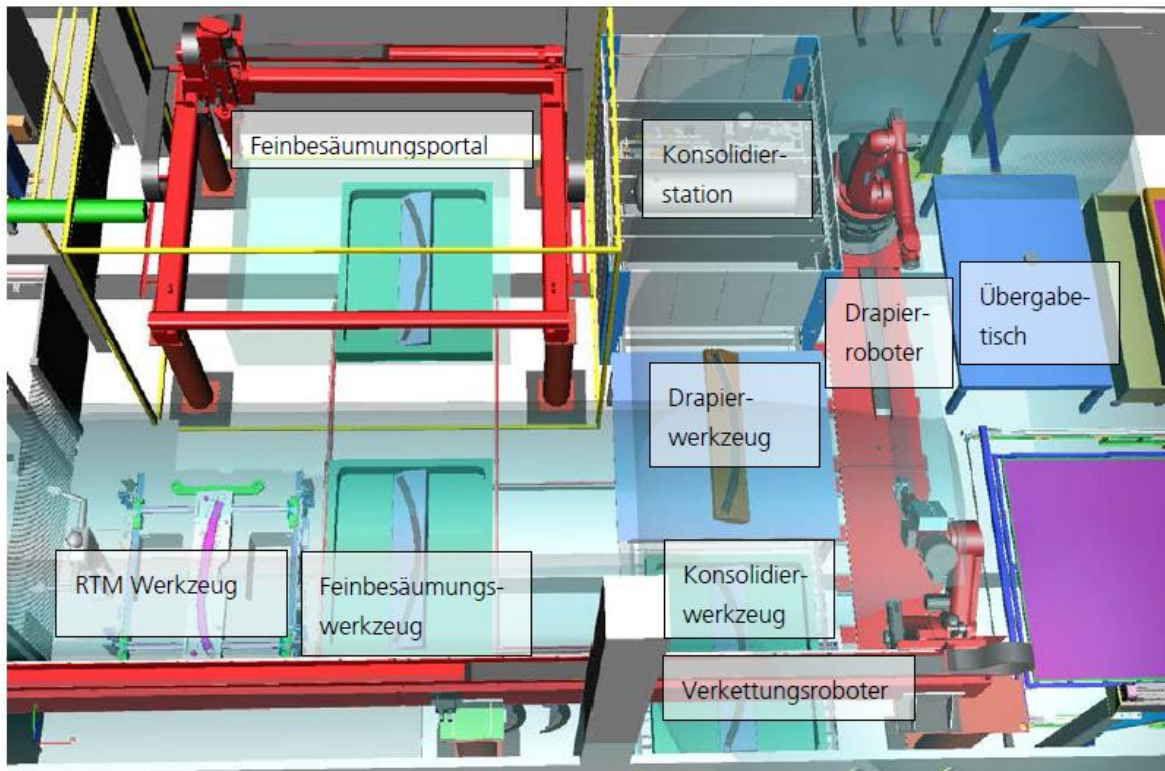


Abbildung 6: Preformieranlage [5]

Im letzten Prozessschritt durchläuft der Preform die *RTM-Anlage*, hier wird das trockene Fasermaterial mit Harz injiziert und ausgehärtet.

In Abbildung 7 sind die vier Prozessschritte des RTM-Verfahrens dargestellt. Der Preform wird in ein zweigeteiltes, eingetrenntes Werkzeug eingelegt. Nachdem das Werkzeug geschlossen wurde, wird unter Druck ein- oder zweikomponentiges Harz in die Kavität injiziert. Bei einer zweikomponentigen Matrix, wird dem Harz bei der Injektion ein Härter beigemischt, welcher die Aushärtung der Matrix ermöglicht. Beim Injektionsprozess trinkt das Harz die Faserlagen und tritt danach aus den Entlüftungssteigern aus. Sobald keine Luftblasen mehr aus den Entlüftungssteigern austreten ist sichergestellt, dass die komplette Kavität mit Harz getränkt ist. Zu diesem Zeitpunkt werden die Entlüftungssteiger geschlossen. Im nächsten Prozessschritt wird, wenn nötig, ein Nachdruck über ein sich nicht im Werkzeug befindliches Harzreservoir bis zur vollständigen Aushärtung des Harzes in der Kavität angelegt. Im vorletzten Prozessschritt wird das Werkzeug geöffnet und das ausgehärtete Bauteil entnommen. Im Anschluss wird das Werkzeug gereinigt und eingetrennt. [7]

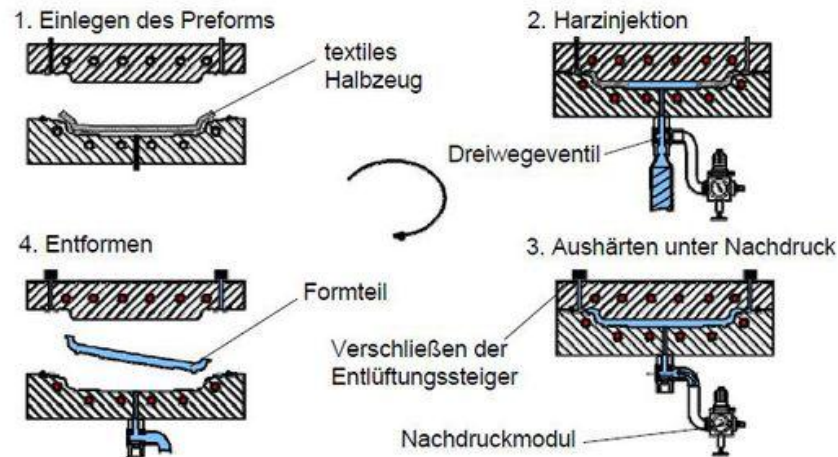


Abbildung 7: Prozessablauf des RTM-Verfahrens [12]

3.2 Feinbesäumung des Preforms

In Zukunft liegt in der Industrie der Schwerpunkt auf der Produktion von CFK-Bauteilen in hoher Stückzahl, die sich gleichzeitig durch eine hohe Komplexität auszeichnen. Jedoch besteht unter produktionstechnischen Gesichtspunkten hinsichtlich der Faserbundbauteile noch Verbesserungspotential, da die geforderten Produktionsraten mit herkömmlich integralgefrästen Aluminiumbauteilen noch nicht vergleichbar sind. Um die geforderten Kapazitäten in einer Serienfertigung abzudecken, müsste wie in Kapitel 1 bereits erwähnt, ein Spant innerhalb von 5,2 Minuten produziert werden. Bei der Aluminiumproduktion ist dies möglich, für komplexe CFK-Bauteile jedoch ein ambitioniertes Ziel.

Die RTM Technologie zeigt sich als geeignet für komplexe Faserverbundbauteile, jedoch entsteht durch unsauberes Ablegen der einzelnen Faserlagen oder geometrisch bedingte Überlappungen keine saubere Bauteilkante, weshalb auf eine zeit- und kostenintensive Nachbearbeitung der Endkontur nicht verzichtet werden kann.

Ein klassisches Verfahren ist das spanabhebende Konturfräsen am ausgehärteten CFK-Bauteil. Bei diesem Verfahren hängt die Schnittgeschwindigkeit und damit auch die Bearbeitungsdauer sehr stark von den Werkstoffeigenschaften ab. Für das Fräsen von Faserverbundkunststoffen müssen die Schneidparameter zwingend angepasst werden, damit es zu keinen Materialschädigungen an den Bauteilkanten in Form von Faserausrisen, Ausfransungen und Delamination kommt. Außerdem haben Kohlenstofffasern abrasive Eigenschaften, was einen hohen Verschleiß der Fräswerkzeuge verursacht. So können beim Fräsen von CFK Bauteilen nur 80m bei einem Vorschub von 5m/min bearbeitet werden, bevor ein Werkzeugaustausch nötig ist. Dabei beträgt der Stückpreis eines Fräser zwischen 250€ - 600€ [13]. Außerdem bilden sich durch den Wärmeeintrag beim Fräsen Mikrorisse, welche die Bauteileigenschaften im Schneidkantenbereich beeinträchtigen. Deshalb müssen nach dem Fräsen die Schnittflächen noch aufwendig versiegelt werden. Das sogenannte *Edge Sealing*¹ erfolgt manuell mit einem Matrixharz und muss bei Raumtemperatur bis zu 24 Stunden und mehr aushärten.

¹ Engl. Kantenversiegelung

Das Forschungsprojekt EVo ermöglicht endkonturnahe CFK-Bauteile ohne Nachbearbeitung zu produzieren und somit den geforderten Zykluszeiten gerecht zu werden, indem mit Hilfe der Feinbesäumung die noch nicht infiltrierte Preforms an den Rändern auf ihre Endkontur besäumt werden. Durch die Feinbesäumung vor dem RTM-Prozess können die oben aufgeführten Fehler im ausgehärteten Bauteil verhindert werden, somit entfällt eine zeit- und kostenintensive Nachbearbeitung durch Fräsen und *Edge Sealing* an den Bauteilkanten. Der entscheidende Vorteil der Feinbesäumung ist, dass die Bearbeitung der Faserverbundbauteile im nicht ausgehärteten Zustand erfolgt. Dadurch können günstige Schneidwerkzeuge mit einem Stückpreis von ca. 140€ (Ultraschallmessertip) verwendet und hohe Vorschubgeschwindigkeiten von bis zu 25m/min gefahren werden.

3.2.1 Roboter und Endeffektor

Der Preform wird durch einen Portalroboter besäumt. Der Roboter verfügt über sechs frei programmierbare Achsen und kann diese mit maximal 1,5m/s bzw. 650°/s bei einer Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,02\text{mm}$ bewegen [14]. Am Endeffektor des Roboters ist die Ultraschalleinheit mit Messer, ein Messtaster, ein Pneumatik- und ein Nadelgreifer sowie ein Laserlichtschnittsensor montiert, vergleiche Abbildung 8.

Der Messtaster dient zur Bestimmung der genauen Werkzeugposition, nachdem der Werkzeuggestisch in die Feinbesäumungszelle gefahren wurde. Mit den gemessenen Positionsdaten werden die Roboterbahnen anschließend korrigiert. Der Nadelgreifer sammelt nach dem Feinbesäumungsprozess den Verschnitt ab. Der Laserlichtschnittsensor dient der Online-Qualitätskontrolle. Mit dem Pneumatikgreifer kann ein Saugaufsatz gegriffen werden, um das Feinbesäumungswerkzeug zu reinigen.

Für diese Arbeit sind die Ultraschalleinheit und der Laserlichtschnittsensor von Bedeutung, deshalb wird in den folgenden Kapiteln deren Funktions- sowie Wirkprinzipien genauer erläutert.

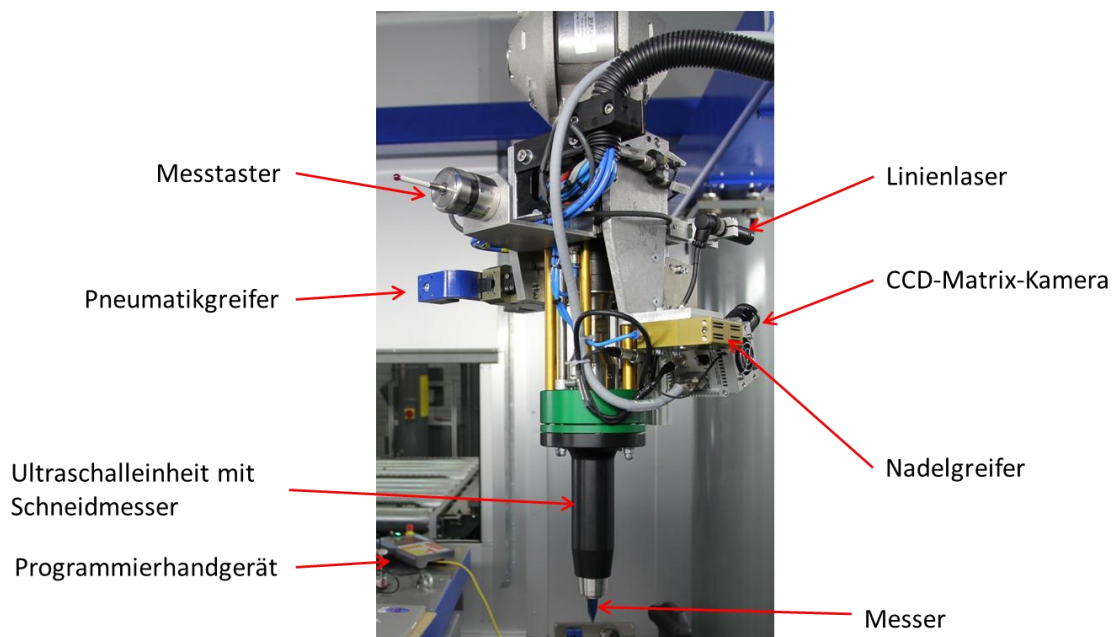


Abbildung 8: Werkzeuge am Endeffektor des Roboters

3.2.2 Programmierung des Feinbesäumungsroboters

Bei der Generierung einer Roboterbewegung wird zwischen der Online- und Offline-Programmierung unterschieden. In der Online-Programmierung, dem Teach-In, wird die Bewegung für den Roboter manuell am Programmierhandgerät (PHG) generiert. Hierbei werden die gewünschten Positionen angefahren und der Positionssatz gespeichert. Anschließend kann die Abfolge der gespeicherten Positionen mit den gewünschten Bewegungsprofilen abgefahren werden. Diese Art der Programmierung ist sehr zeitaufwendig und ungenau.

Die Offline-Programmierung der Roboterbewegungen erfolgt hingegen in einer Simulationssoftware am Computer und wird anschließend auf die Robotersteuerung übertragen. Beim DLR wird die Software *CENIT FASTCURVE*, eine externe Erweiterungstoolbox für das CAD Programm *CATIA/Delmia*, zur Programmierung genutzt.

Die CAD Daten des Roboters und seiner Umgebung, sprich des Spantes, des Feinbesäumungswerkzeuges und des Werkzeuggestisches, sind als *CATIA Product* hinterlegt, siehe Abbildung 9. Des Weiteren ist die gesamte Roboterkinematik von der Firma *CENIT* in das Modell eingepflegt und als *FASTCURVE Process* gespeichert. Die in Abbildung 9 dargestellten Werkzeuge am Endeffektor, wie das Ultraschallmesser, ein Nadelgreifer und ein Laserlichtschnittsensor, haben einen eigenen Tool-Center-Point (TCP). Der TCP bestimmt die Position der Werkzeugspitze zum Roboterursprung. Für den Offline-Feinbesäumungsprozess wird somit der TCP des momentan vorliegenden Messers ausgewählt, sodass das Messer um einen definierten Abstand in das Textil eintaucht. Die Vorteile der Offline-Programmierung sind, dass der Roboter die vorher im CAD definierten Bewegungen exakt abfahren kann. Des Weiterem können Werkzeugwinkel eingestellt werden, die zwischen den einzelnen Positionen und somit während des Schneidvorgangs konstant vorliegen. Aufgrund dieser Vorteile wird die Offline-Programmierung für die im Folgenden erläuterten Versuche verwendet.

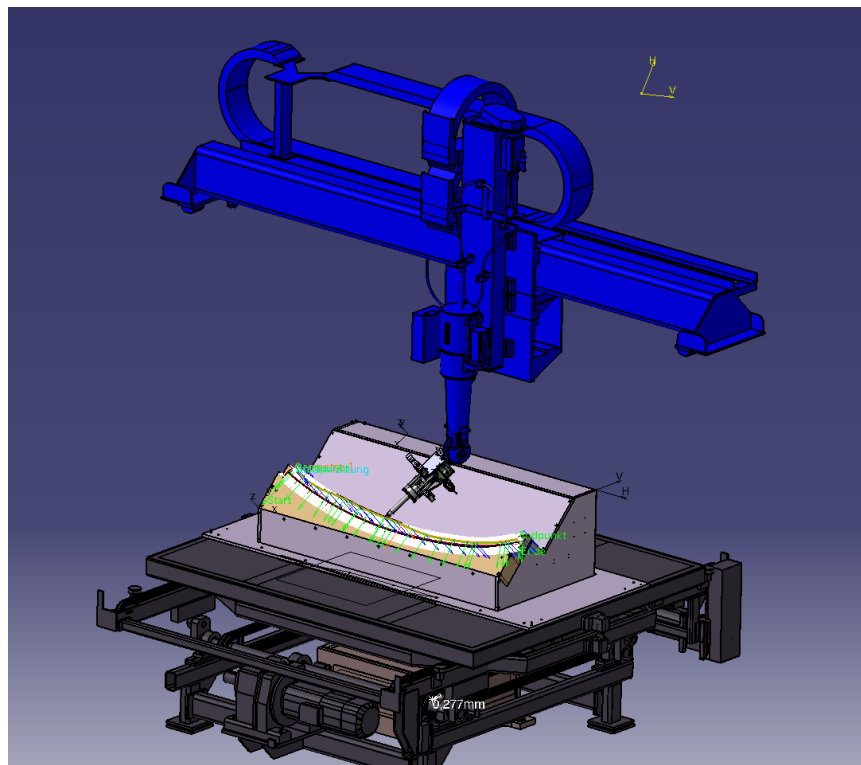


Abbildung 9: Feinbesäumungszelle in der Offlineprogrammierung

3.2.3 Schneiden mit ultraschallangeregter Klinge

Bei einem Ultraschallmesser werden die einzelnen Fasern durch den „Sägeeffekt“ des schwingenden Messers getrennt. Dieser Effekt entsteht durch die Schwingung des Ultraschallmessers in Stoßrichtung und wirkt sich positiv auf das Schnittergebnis aus. Der „Sägeeffekt“ lässt sich durch die Schnittgeschwindigkeit \vec{v}_c , die sich vektoriell aus der Schwinggeschwindigkeit \vec{v}_s und der Vorschubgeschwindigkeit der Schneide \vec{v}_f zusammensetzt, beschreiben, siehe Abbildung 10. Dabei ist die Schwinggeschwindigkeit deutlich größer als die Vorschubgeschwindigkeit und erhöht maßgeblich die Schnittgeschwindigkeit, welches sich dann in der Reduzierung der Schnittkraft äußert. [15]

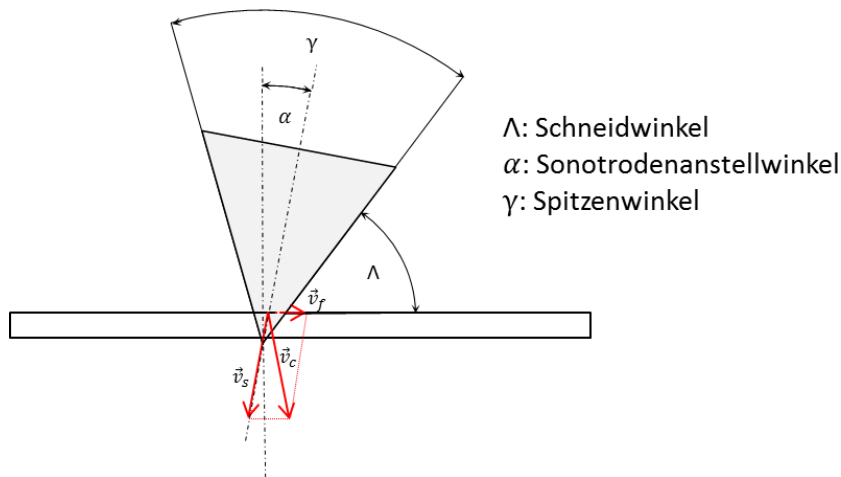


Abbildung 10: Vektorielle Darstellung der Schnittgeschwindigkeit

Beim Schneiden ohne ultraschallangeregter Klinge ist die Schnittgeschwindigkeit gleich der Vorschubgeschwindigkeit. Bei angeregter Klinge beträgt hingegen die durchschnittliche Schnittgeschwindigkeit:

$$\vec{v}_c = \vec{v}_f + \vec{v}_s = \begin{pmatrix} v_{fx} \\ v_{fy} \\ v_{fz} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{sx} \\ v_{sy} \\ v_{sz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{fx} + v_{sx} \\ v_{fy} + v_{sy} \\ v_{fz} + v_{sz} \end{pmatrix}$$

Dabei ist v_s das Produkt aus dem zurückgelegtem Weg und der Frequenz:

$$\vec{v}_s = 4 * s_{max} * f$$

Der zurückgelegte Weg während einer Periodendauer ist in Abbildung 11 dargestellt und entspricht der vierfachen Amplitude.

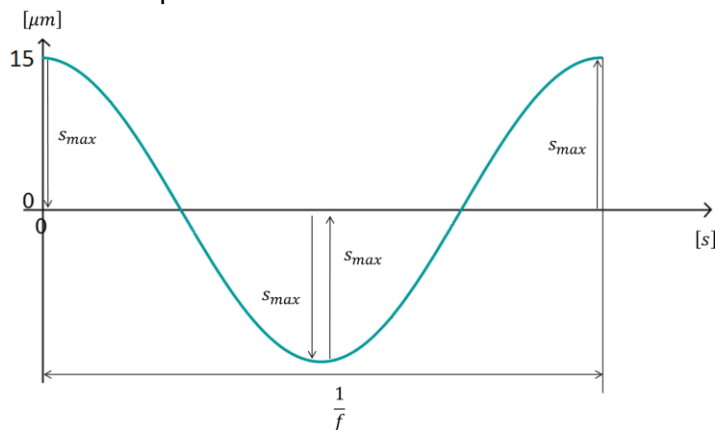


Abbildung 11: Veranschaulichung der Berechnung von \vec{v}_s

Zur Verdeutlichung des Einflusses der Schwinggeschwindigkeit wird im Folgenden ein Beispiel anhand der im DLR vorliegenden Anwendungsfalls betrachtet. Hierbei beträgt die Schwinggeschwindigkeit bei einer Amplitude von 15µm, einer Frequenz von 19960Hz und einer üblichen Vorschubgeschwindigkeit von 250mm/s:

$$v_s = 4 * 0,015mm * 19960 \frac{1}{s} = 1197,6 \frac{mm}{s}$$

Davon ausgegangen, dass die Schwingrichtung senkrecht zur Vorschubrichtung steht, ist die Schnittgeschwindigkeit:

$$\vec{v}_c = \begin{pmatrix} 250 \frac{mm}{s} & + & 0 \frac{mm}{s} \\ 0 \frac{mm}{s} & + & (-1197,6 \frac{mm}{s}) \\ 0 \frac{mm}{s} & + & 0 \frac{mm}{s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 250 \frac{mm}{s} \\ -1197,6 \frac{mm}{s} \\ 0 \frac{mm}{s} \end{pmatrix}$$

$$v_c = \sqrt{\left(250 \frac{mm}{s}\right)^2 + \left(-1197,6 \frac{mm}{s}\right)^2} = 1223,416 \frac{mm}{s}$$

Die beispielhafte Berechnung veranschaulicht deutlich die Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit einer ultraschallangeregten Klinge im Vergleich zu einer nicht angeregten Klinge, bei der die Schnittgeschwindigkeit gleich der Vorschubgeschwindigkeit ist. Das Ergebnis einer hohen Schnittgeschwindigkeit und der daraus resultierenden reduzierten Schneidkraft, ist eine bessere Schneidqualität, da die Fasern nur geringfügig beim Schneiden verschoben werden.

Bezogen auf das Schneiden von Prepregs konnten König und Neder (1986) beobachten, dass beim Schneiden ohne ultraschallangeregte Klinge sehr starke Schneidkraftschwankungen auftreten. Diese Schwankungen sind darauf zurückzuführen, dass die konventionelle Schneide deutlich länger als bei ultraschallunterstützten Schneiden gegen die Faser drückt und diese soweit spannt, bis es zu einem Faserriss kommt. [15]

Weiteren Einfluss auf die Schnittergebnisse hat der Schneidwinkel Λ . Der Schneidwinkel ist abhängig vom Spitzenwinkel γ und dem Sonotrodenanstellwinkel α :

$$\Lambda = 90^\circ - \alpha - \frac{\gamma}{2}$$

Abbildung 12 zeigt den Einfluss des Schneidwinkels auf den Keilwinkel β des Messers. Mit abnehmendem Schneidwinkel verringert sich der Keilwinkel β der Schneide und bewirkt dadurch eine Reduzierung der Schneidkraft. [16]

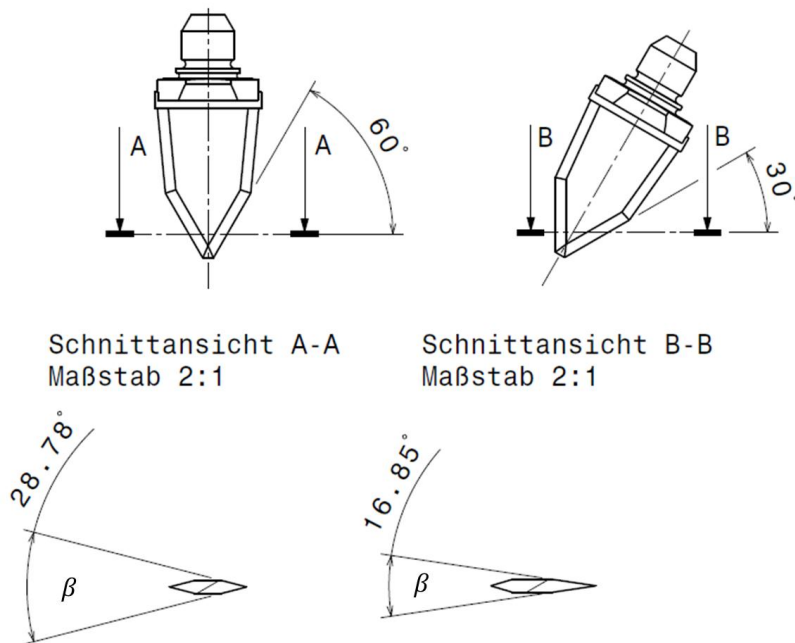


Abbildung 12: Einfluss des Schneidwinkels Λ auf den Keilwinkel β

Des Weiteren wird das zu schneidende Textil durch eine angestellte Klinge auf die Schneidunterlage gedrückt. Diese Niederhaltekraft trägt dazu bei, dass die Fasern beim Schneiden weniger in Vorschubrichtung verschoben werden. Das bedeutet auch, dass bei spitzen Schneidwinkeln die Niederhaltekraft größer und der effektive Keilwinkel kleiner werden, sich aber gleichzeitig die Schnittgeschwindigkeit verringert. Durch das Anstellen des Ultraschallmessers zeigt die Vertikalkomponente \vec{v}_{sy} der Schwinggeschwindigkeit entgegen der Vorschubgeschwindigkeit \vec{v}_f und bewirkt eine Verringerung der Schnittgeschwindigkeit.

Aufgrund der vorgestellten Vorteile wird das Trennen mit Ultraschall in den verschiedensten Industriezweigen wie z.B. der Textil-, Lebensmittel und Kunststoffindustrie angewendet. Ultraschallunterstütztes Schneiden wird bei vielen verschiedenen Materialien zum Zerteilen und Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide genutzt. Bearbeitet werden zum Beispiel sprödharte Werkstoffe, Metalle, Holz, Vlies, Textilien, Prepregs und biologisches Gewebe. Die positiven Eigenschaften des Ultraschallschneidens sind die Reduzierung der Schneidkraft und eine deutliche Qualitätsverbesserung der Schnittkanten. [16]

Zur Erläuterung des Funktionsprinzips eines Ultraschallmessers wird im Folgenden der Aufbau einer Ultraschallschneidmaschine gezeigt.

Ultraschallschneidmaschinen bestehen aus Generator, Konverter, Boostersonotrode und Schneidmesser, die wie in Abbildung 13 ersichtlich angeordnet sind.

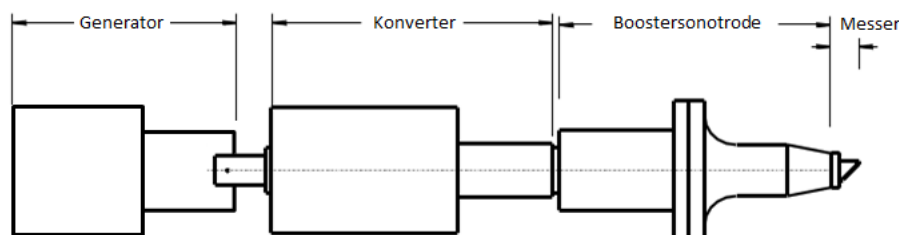


Abbildung 13: Schematischer Aufbau einer Ultraschallschneidanlage

Der Ultraschallgenerator oder auch Hochfrequenzgenerator wird mit einer ortsüblichen Netzspannung von 230V/50Hz betrieben und transformiert diese auf die Resonanzfrequenz des Systems sowie auf die gewünschte Amplitude.

Der Ultraschallgenerator gibt seine Ausgangsfrequenz und –spannung weiter an den Konverter. Die Aufgabe des Konverters ist die elektrische in eine mechanische Schwingung bei gleichbleibender Frequenz umzuwandeln. Der Konverter arbeitet hierbei nach dem umgekehrten piezoelektrischen Effekt.

Der direkte piezoelektrische Effekt ist das Entstehen einer elektrischen Ladung bei einer Vielzahl von Kristallen (z.B. Quarz), welche unter Druck oder Dehnung stehen. Werden piezoelektrische Kristalle, wie in Abbildung 14 dargestellt, an ein elektrisches Wechselfeld geschlossen, so stauchen sich die Kristalle in der negativen und dehnen sich in der positiven Phase des elektrischen Wechselfeldes. Dieser Effekt wird dann als umgekehrter piezoelektrischer Effekt bezeichnet und sorgt dafür, dass sich das Messer oszillierend auf und ab bewegt. [17]

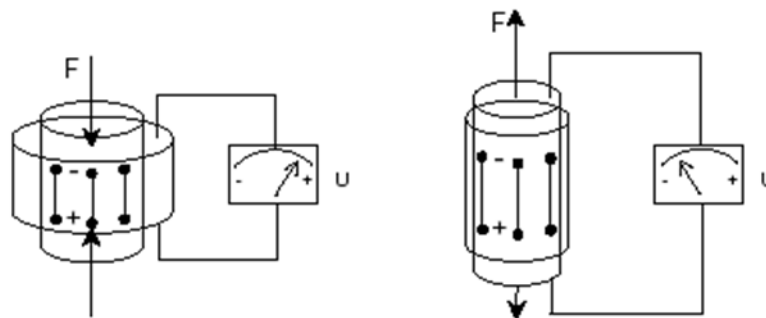


Abbildung 14: Umgekehrter piezoelektrischer Effekt [18]

Die vom Konverter erzeugte Schwingung wird an der schallabstrahlenden Endfläche der Boostersonotrode reflektiert. Die reflektierte und die vom Konverter erzeugte Welle überlagern sich und es bildet sich eine stehende Welle mit konstanten Wellenbäuchen und Knotenpunkten. Im Schwingungsknoten kann die Boostersonotrode gelagert werden. Demgegenüber befindet sich das Messer im Schwingungsbauch und schwingt somit bei maximaler Längsamplitude. Die Boostersonotrode dient der Amplitudentransformation und der Stabilisierung des Schwingungsverhaltens des Systems sowie der Schwingungsfortleitung an die Messerspitze. Die vom Konverter erzeugte Schwingungsamplitude wird durch die Boostersonotrode vergrößert, hierbei schwingt die Boostersonotrode in Resonanzfrequenz.

3.2.4 Laserlichtschnittverfahren

Das Laserlichtschnittverfahren ist ein berührungsloses Verfahren zur optischen Bestimmung von Abständen. Es basiert auf dem aktiven Triangulationsprinzip, welches sich der geometrischen Beziehungen eines Dreiecks bedient. Abbildung 15 zeigt vereinfacht das Funktionsprinzip der aktiven Triangulation an einer eindimensionalen Laserlichtschnittmessung. Durch den bekannten Basisabstand B und den messbaren Winkel α ist das gezeigte rechtwinklige Dreieck eindeutig bestimmt, sodass die Objektentfernung d berechnet werden kann. [19]

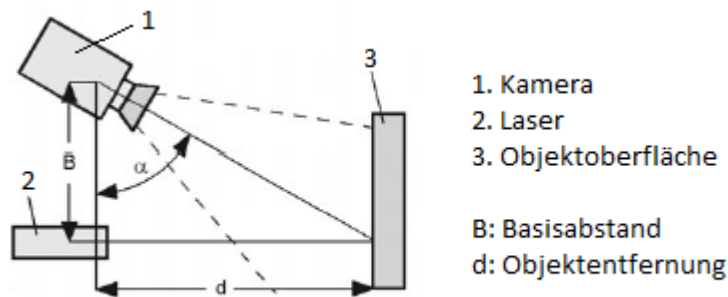


Abbildung 15: Vereinfachte Darstellung des Laserlichtschnittverfahrens [19]

In der EVo-Anlage kommt ein 2D Laserlichtschnittsystem zum Einsatz. Hierzu wird eine zielgenaue Laserlinie auf das Bauteil projiziert, deren Reflexion gleichzeitig von einem parallel angeordneten Matrix-Sensor einer Kamera, wie in Abbildung 16 dargestellt, registriert wird. Zur Registrierung der Laserreflexion vom Bauteil kommt ein CCD (Charge-Coupled Device) Matrix-Sensor zum Einsatz, wie er auch in handelsüblichen Digitalkameras zu finden ist. Dabei erhält jeder belichtete Pixel des Sensors über die Triangulation einen eigenen Höhenwert. Die Zusammensetzung aller Höhenwerte ergibt den Profilschnitt der gescannten Oberfläche. [19] [20]

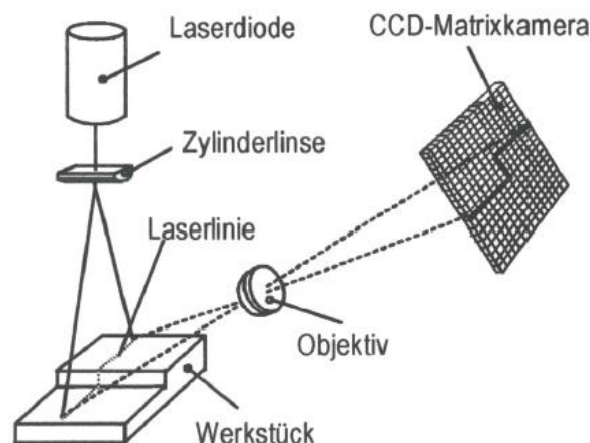


Abbildung 16: 2D Laserlichtschnittmessung [20]

Das Laserlichtschnittsystem wird bereits erfolgreich zur Bestimmung von Bauteiltoleranzen des Preforms im DLR verwendet. Das Lasermodul von LASER COMPONENTS und die Kamera C4-4090GigE von Automation Technology sind am Feinbesäumungsroboter montiert und kalibriert. Für die Benutzung des Systems muss nur ein Netzkabel zwischen Kamera und Messrechner angebracht werden, damit die Messdaten übertragen werden können.

3.3 Bewertung der Schnittkantenqualität

Zur Definition der Qualität einer Schnittkante sind messbare Qualitätsmerkmale zu identifizieren. Zur Analyse des Textils können Prüfsysteme von den Firmen PROFRACOR GmbH und Apodius GmbH verwendet werden. Diese Systeme können an textilen

Halbzeugen die Faserorientierung untersuchen und Fehler, wie zum Beispiel Fisheyes, Faserbruch und Ondulation detektieren. Beide Systeme nutzen optische Messverfahren, welche mit Hilfe einer Kamera und Bildverarbeitungsalgorithmus Faserstrukturen an der Oberfläche untersuchen können, siehe Abbildung 17.

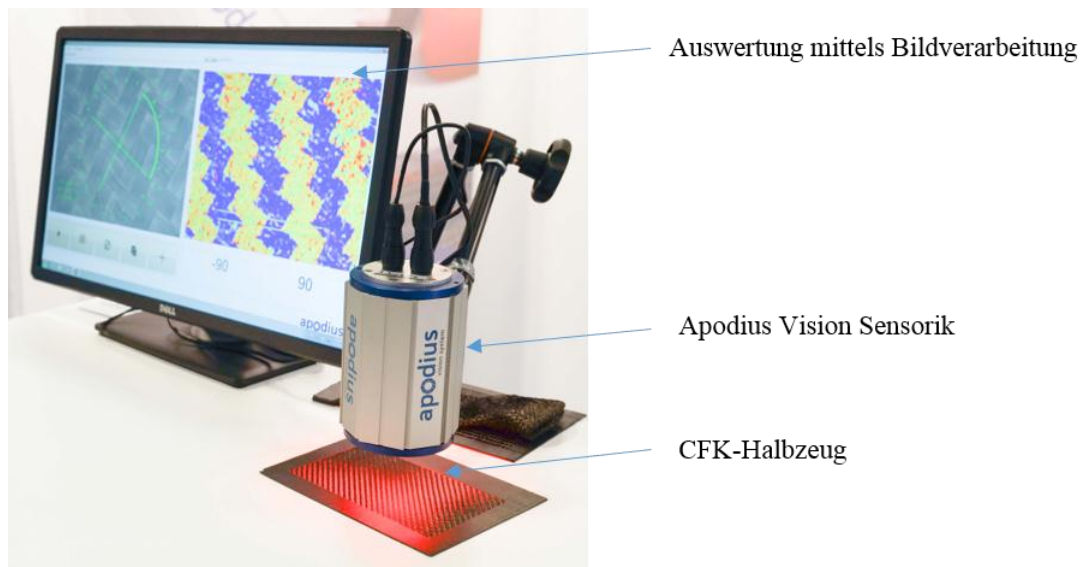


Abbildung 17: Messsystem von der Firma Apodius GmbH [21]

In Zusammenarbeit der Firma Apodius GmbH mit dem Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen University wurden zwei Projekte erarbeitet, deren Thema die Erfassung und Bewertung der Schnittqualität an CFK Halbzeugen war. Die *Apodius Vision Sensorik* ermöglicht Ausfransungen an der Schnittkante zu detektieren sowie die Ermittlung des Faserwinkels an der Schnittkante nach dem Trennprozess, welcher mit dem Ausgangswinkel verglichen werden kann, vgl. Abbildung 18. Letzteres wurde auch in Folgeprojekten am ITA als Definition für die Schnittqualität von technischen Textilien verwendet, da eine fehlerhafte Faserorientierung signifikante Festigkeitseinbußen in den Randbereichen hervorruft [22].

Die Systeme der Firmen PROFACTOR GmbH und Apodius GmbH eignen sich für automatisierte Prozesse und können in Fertigungsanlagen zur Online-Qualitätssicherung verwendet werden.

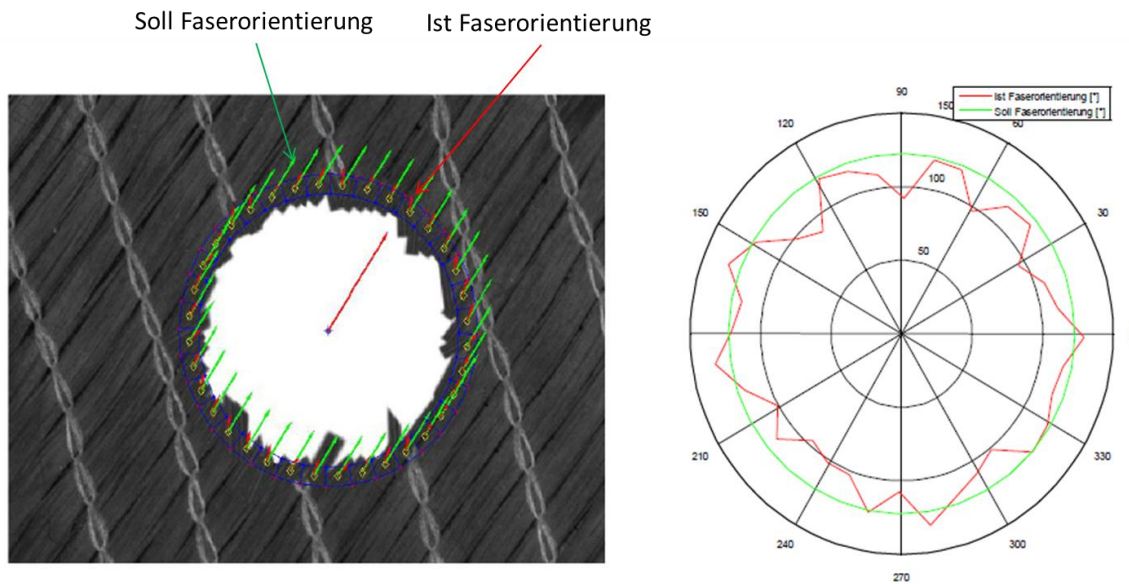


Abbildung 18: Vergleich der Faserorientierung durch die Apodius Vision Sensorik [21]

Für grundlegende Schnittkantenuntersuchungen kann auch ein Digitalmikroskop, wie z.B. der Firma Dino Lite, siehe Abbildung 19, mit einer Messsoftware verwendet werden, in der die Faserorientierung manuell bestimmt werden kann. Diese Methode ist eine günstige und genaue Alternative, um eine Aussage über die Qualität der Schnittkante treffen zu können. Diese Methode wird in den durchgeführten Versuchen verwendet und in 5.5 näher erläutert.

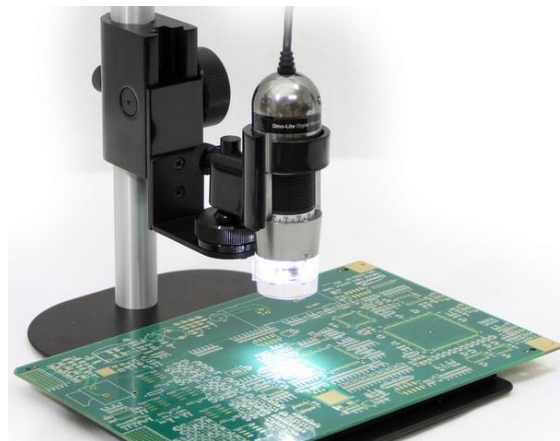


Abbildung 19: Digitalmikroskop der Firma Dino Lite

4 Schwachstellen des Feinbesäumungsprozess und Optimierungsansätze

Im Feinbesäumungsprozess der EVo-Anlage wurden eine schlechte Schneidqualität und eine fehlende Fixierung des inneren Preformflansches am Feinbesäumungswerkzeug als wesentliche Schwachstellen ermittelt. Abbildung 20 zeigt den Seitenbereich eines besäumten Spanten, die gestrichelte Line stellt die eigentliche Schnittkontur dar. Es sind deutliche Ausfransungen in den Seitenbereichen zu erkennen, besonders am inneren Flansch, teilweise wurden einzelne Fasern nicht geschnitten. Auch die Faserorientierung im Schnittkantenbereich wurde durch das Schneiden stark beeinflusst, diese weicht deutlich von der Ausgangsorientierung ab. Des Weiteren wurde der Preform an der langen Seite des inneren Flansches teilweise falsch geschnitten. Die Ursache ist in Abbildung 21 zu erkennen: der Preform steht vom Werkzeug ab. Die für die Preformfixierung auf dem Werkzeug verantwortliche Ansaugung ist nicht ausreichend stark dimensioniert um den Spalt zu überbrücken und den inneren Flansch des Preforms anzusaugen. In Folge der fehlenden Fixierung wird der Preform vom Schneidmesser verschoben und dadurch an falschen Stellen geschnitten und ist somit ein Ausschussteil.

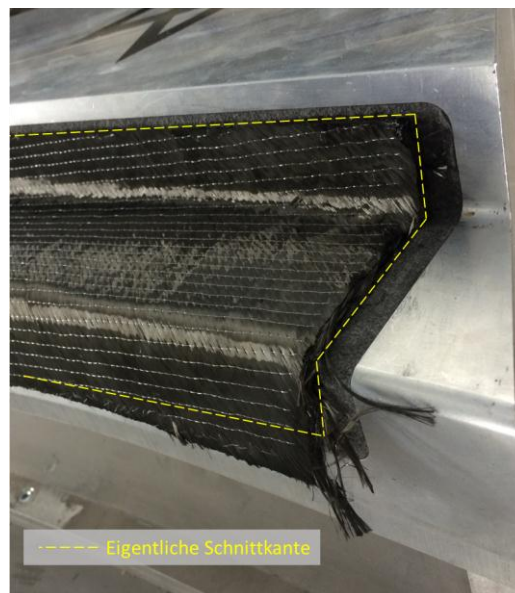


Abbildung 20: Ausfransungen der Schnittkanten

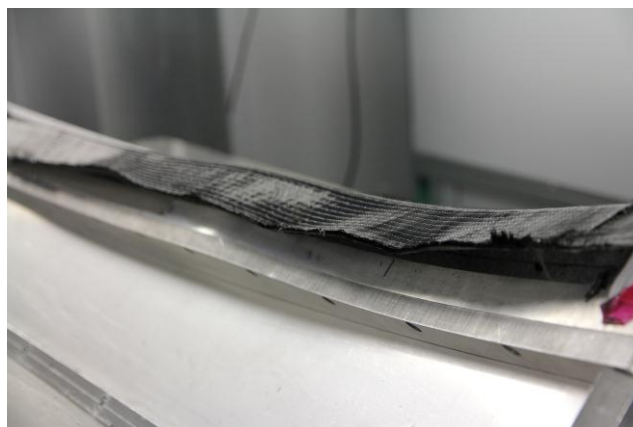


Abbildung 21: Fehlerhafte Lage des Preforms auf dem Feinbesäumungswerkzeug

Um die Schneidqualität signifikant im Feinbesäumungsprozess verbessern zu können werden in dieser Arbeit in Kapitel 5 grundlegende Schneidversuche durchgeführt. Mit den gewonnenen Erkenntnissen der Schneiduntersuchungen kann anschließend eine neue Schneidbewegung für die Feinbesäumung generiert werden.

Es zeigte sich, dass durch ein manuelles Andrücken des Preform an den inneren Flansch die Ansaugung des Feinbesäumungswerkzeuges ausreichend ist, um diesen am Werkzeugflansch zu fixieren. Zielführend ist es hier eine Andrückvorrichtung zu entwickeln, welche den Preform vor dem Schneiden an das Werkzeug drückt (Kapitel 7.1).

Um anschließend zu überprüfen, ob der Preform am Feinbesäumungswerkzeug richtig fixiert ist, wird in Kapitel 7.2 versucht, mithilfe von Scans des Laserlichtschnittsensors die Lage des Preforms zum Werkzeug zu bestimmen.

5 Schneidversuche

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Parameter, die einen direkten Einfluss auf die Qualität des Feinbesäumungsprozesses haben, wie z.B. die Vorschubgeschwindigkeit, der Schneidwinkel und die Amplitudenhöhe, identifiziert und untersucht.

Des Weiteren werden die Konstruktion und die Umsetzung eines Schneidtisches erläutert.

5.1 Probenauswahl und Vorbereitung

Die Auswahl der Preformproben für die Schneiduntersuchungen, des Schneidwinkel, der Geschwindigkeit und Amplitude erfolgt auf Basis von Erkenntnissen bereits geschnittener Preforms. Hieraus sind deutliche Schwachstellen in der obersten und untersten Textillage, welche jeweils ein Biaxialgelege sind, zu erkennen. Für die Untersuchungen wird deshalb ein Preform aus sechs Lagen des Biaxialgelege der Firma Toho Tenax Europe GmbH verwendet, welches den zwölf Einzellagen des EVo Spantes entspricht. Somit ist die Übertragbarkeit der ermittelten Ergebnisse gegeben.

Aufgrund der Tatsache, dass der EVo Spant neben Biaxialgelegen auch aus Triaxial- und UD-Gelegen besteht, werden für die Untersuchungen folgende Preforms verwendet:

- 6 Lagen Biaxialgelege
- 4 Lagen Triaxialgelege
- 12 Lagen Unidirektionalgelege jeweils mit einer Faserorientierung von 0° und 90° zur Schnittkante

Damit die Preforms nach dem Schneiden untereinander verglichen werden können, müssen sie immer aus zwölf Einzellagen bestehen.

Für die Untersuchungen haben die Preforms eine definierte Abmessung von 160mm x 100mm. Zudem werden alle Proben mit folgenden Parametern nach Tabelle 2 konsolidiert.

Tabelle 2: Konsolidierparameter für die Versuchsproben

Vorwärmzeit	70s
Vorwärmtemperatur	70°C
Hydraulikdruck	23bar
Vakuumzeit	20s
Vakuum aus bei Formdruck	23bar
Druck	3bar
Dauer	120s
Temperaturzone 1-3	150°C

Des Weiteren werden in der Offline-Programmierungsumgebung von Fastcurve die Roboterbahnen für die Schnittbewegung programmiert. Es wird für jeden zu untersuchenden Anstellwinkel des Messers ein Programm generiert, welches immer dem in Abbildung 22 dargestellten Ablauf entspricht. Der Programmablauf besteht aus dem Heranfahren an den Schneidisch, dem eigentlichem Schneiden und dem Zurückfahren in die SafePos (Parkposition). Wichtig ist die Vorgabe einer linearen Bewegungsart beim Schneiden, da hier der Roboter mit dem TCP einer vorgegeben Linie zwischen zwei Punkten folgt. Bei einer Point to Point Bewegungsart, welche für das Verfahren vor und nach der Schneidbewegung ausgewählt wird, bewegt der Roboter alle Achsen zeitlich synchron um zwischen zwei Punkten zu verfahren, dabei folgt der TCP keine vorgegeben Trajektorie mehr. Die aus Fastcurve exportierten Programme wurden anschließend über die Netzwerkschnittstelle auf den Speicher des Roboters übertragen.

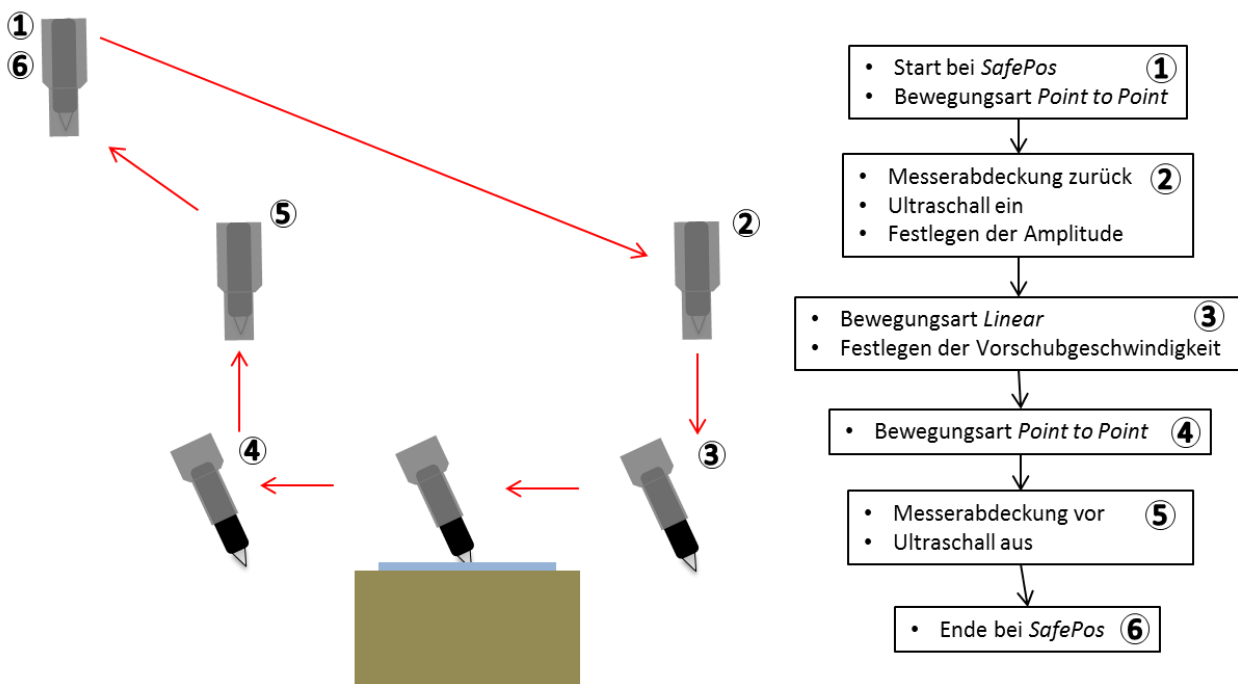


Abbildung 22: Programmablauf beim Schneidversuch

5.2 Konstruktion eines Schneidtisches

Das aktuelle Feinbesäumungswerkzeug des EVo Spants ist aufgrund der komplexen Schneidnutgeometrien für fundamentale Schneidversuche ungeeignet. Aus diesem Grund wurde ein Versuchstisch konstruiert und umgesetzt, welcher die gegebenen Bedingungen des Feinbesäumungswerkzeuges auf einen waagrecht, ebenen Versuchsträger möglichst genau abbildet. Dazu gehören die Fixierung des Textils mittels Unterdruck, der Schneidnutquerschnitt und das Schneidnutmaterial des Feinbesäumungswerkzeuges.

Als Basis des Schneidtisches dient ein 240mm x 140mm x 120mm breiter Quader aus ITEM Typ 5 Profilen. Über Nutzensteine werden die Außenplatten, welche an einer 2,5D Fräse aus Kunststoff gefertigt wurden, mit Senkkopfschrauben befestigt. Der benötigte Unterdruck wird durch einen BOSCH Industriestaubsauger erzeugt, der mit einer 3D Drucker erzeugten Schlauchkupplung am Versuchstisch angeflanscht wird. Auf der Oberseite des Versuchstisches befindet sich eine austauschbare 7,8mm dicke Deckplatte, welche mit Schrauben befestigt wurde. Die Deckplatte weist die in Abbildung 23 dargestellte Schneidnutgeometrie auf, in der sich das Nutmaterial befindet. Außerdem sind alle Kanten

und Schraubenköpfe des Schneidtisches mit Tape luftdicht abgedichtet. Die Versuchsplattform wurde am Werkzeuggestisch in der Feinbesäumungszelle montiert und ebenfalls in der Offline-Umgebung von Fastcurve an derselben Position eingefügt.

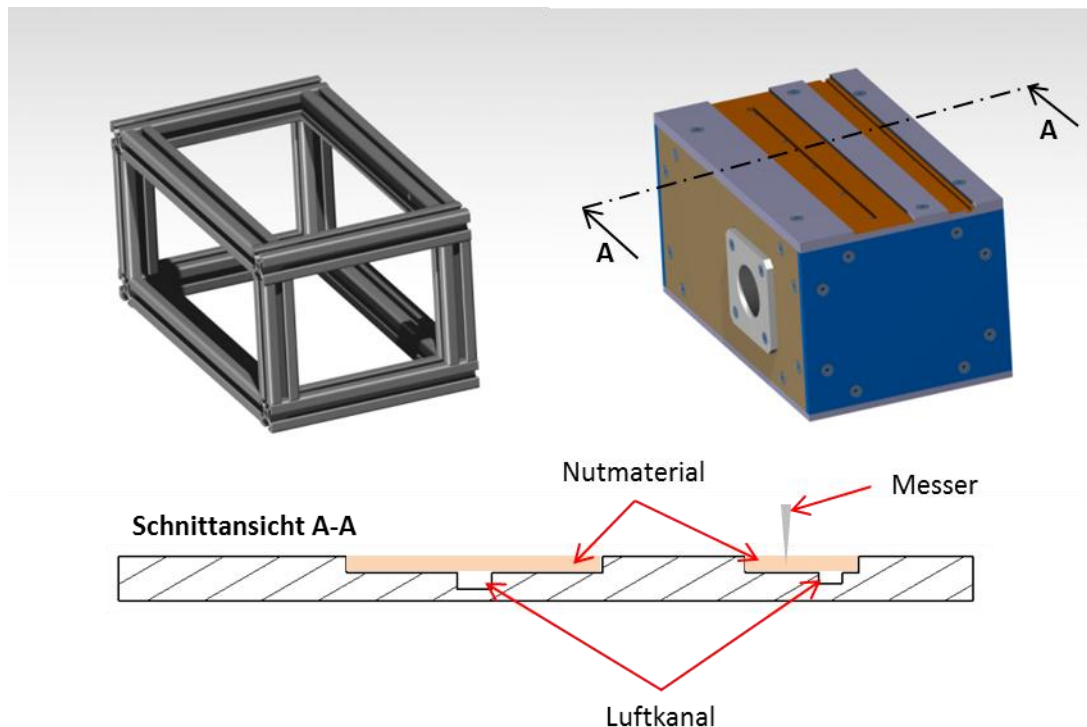


Abbildung 23: Entwurf des Schneidtisches

5.3 Versuchsaufbau

Für die Schneidversuche wird ein Industrieroboter vom Typ RL des Herstellers Reis GmbH(1), an dessen Endeffektor eine 20kHz Ultraschalleinheit der Firma EM-Systeme GmbH(2) montiert ist, verwendet. In die Boostersonotrode der Ultraschalleinheit ist, wie aus Abbildung 24 ersichtlich, ein Hartmetallmesser eingeschraubt. Für die durchzuführenden Versuche werden Messer mit einem Spitzenwinkel von 60° verwendet. Der Versuchsschneidtablett (5) ist an der gleichen Position wie in der Offline-Programmierung, auf dem Feinbesäumungswerkzeugträger montiert. Auf dem Schneidtablett wird im Vakuumbereich die Versuchsprobe (4) für die Schnitte aufgelegt. Das benötigte Vakuum (6) des Versuchstisches wird durch einen leistungsstarken Werkstattstaubsauger (Bosch GAS 25L SFC) erzeugt(6).

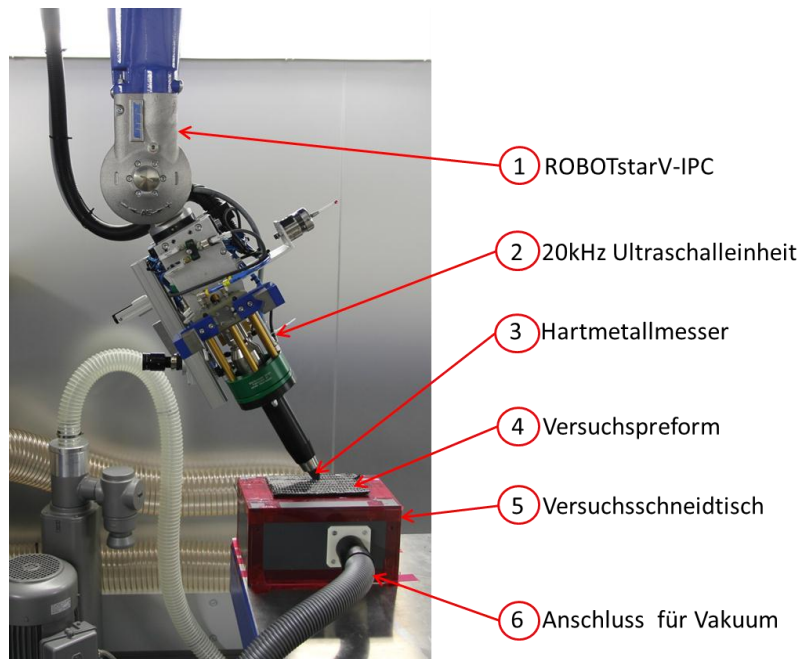


Abbildung 24: Versuchsaufbau

5.4 Allgemeine Versuchsdurchführung am Schneidtablett

Der konsolidierte Preform wird an der markierten Stelle auf dem Schneidtablett positioniert und durch Einschalten des Unterdrucks fixiert. Dabei ist zu überprüfen, dass der Preform eben aufliegt, da ansonsten eine reduzierte Saugwirkung vorliegt. Im nächsten Schritt wird der Feinbesäumungsroboter über das Programmierhandgerät bedient. Auf dem Speicher des Roboters sind für die Versuche die zuvor erstellten Schneidprogramme zu den verschiedenen Schneidwinkeln hinterlegt. Nach der Wahl des Schneidwinkels muss die gewünschte Amplitude und Vorschubgeschwindigkeit an den in Abbildung 25 rot markierten Stellen im Programm editiert werden. Die Amplitude wird im Programm als Spannungswert angegeben, in Tabelle 3 sind die dazugehörigen Amplitudenhöhen in Mikrometer aufgeführt. Damit die Störgröße des Messerverschleißes über eine gesamte Versuchsreihe sich nicht negativ auf die zuletzt untersuchten Parameter stärker, als die am Anfang einer Reihe untersuchten Parameter, auswirkt, werden alle Versuche nach einer Zufallsreihenfolge durchgeführt. Eine beispielhafte Versuchsreihe wäre: 30°, 20°, 10°, 15°, 25°.

```
POSITION #N,VORR,X:34.778,Y:1175.734,Z:-952.657,A:-90,B:-45,C:-180,A1
C Parkposition vor Schnitt
MESSERABDECKUNG #ZURUECK
/USC #EIN
C Hier anpassen der Amplitude; Achtung nur zwischen 5-10
ANA_AUSG Spannung:10.0000,Kanal:5
C
BEWEG_ART #LINEAR
C Hier die Geschwindigkeit editieren:
BAHN_GESCHW [mm/s]:100
BAHN_BESCHL [%]: 100
POSITION #N,VORR,X:34.778,Y:989.808,Z:-1138.583,A:-90,B:-45,C:-180,A1
POSITION #N,VORR,X:-95,Y:989.808,Z:-1138.583,A:-90,B:-45,C:-180,A1:11
POSITION #N,VORR,X:-345,Y:989.808,Z:-1138.583,A:-90,B:-45,C:-180,A1:1
POSITION #N,VORR,X:542.851,Y:989.808,Z:-1138.583,A:-90,B:-45,C:-180
```

Abbildung 25: Editieren der Amplitude und Vorschubgeschwindigkeit

Tabelle 3: Zuordnung der Spannungswerte zur Amplitudenhöhe

Spannung [V]	10	9	8	7	6	5
Amplitudenhöhe [μm]	15	13	12	Keine Herstellangab e	Keine Herstellangab e	Keine Herstellangab e

Nachdem die Amplitude und die Vorschubgeschwindigkeit angepasst sind, wird der Roboter in den Auto-Test geschaltet und die Einzelsatzbetriebsart TEST3 gewählt. Diese beiden Schritte sind wichtig, da ansonsten die Verfahrgeschwindigkeit reduziert, die Überschleif-Funktion unterdrückt und binäre Ausgänge wie das Zurückfahren der Messerabdeckung nicht geschaltet werden. [23]

Nach dem Schneiden der Probe wird der Roboter in die Safepos gefahren und mit der Auswertung des Versuches, wie in 5.5 beschrieben, begonnen. Am Ende eines Schneidversuches wird der Schneidisch, vor allem die Schneidnut, von Faserresten befreit, damit diese die Bewertung der Schnittkante bei späteren Versuchen nicht negativ beeinflusst.

5.5 Allgemeines Vorgehen bei der Qualitätsauswertung

Die Schnittqualität wird durch eine visuelle Beurteilung der Schnittkantenbeschaffenheit bewertet. Berücksichtigt werden Ausfransungen von Fasern und ungeschnittene Fasern sowie Strukturänderungen des Textils im Schnittkantenbereich. Die Beurteilung erfolgt unmittelbar nach der Durchführung des Schnittes. Um die visuelle Beurteilung der Schnittkante mit einem messbaren Wert validieren zu können, werden mit einem Digitalmikroskop, wie in den in Abbildung 26 dargestellten Messpunkten, jeweils eine Aufnahme gemacht. Diese Aufnahmen werden anschließend mit der Software DinoCapture 2.0 ausgewertet. Bei der Auswertung werden alle Messungen dreimal pro Aufnahme durchgeführt um Messfehler abzufangen.

Ein Vorversuch zeigte, dass durch das Eindringen des Schneidmessers in den Preform die Faser im Anfangsbereich stark gestört wird. Um diesen Effekt näher zu untersuchen, wird ein Preform mit einem Schneidwinkel von 30° , einer Amplitude von 100% und einer Vorschubgeschwindigkeit von 300mm/s geschnitten. Nach dem Schnitt wird alle 10mm die Abweichung der Faserorientierung gemessen. Der in Abbildung 27 dargestellte Kurvenverlauf verdeutlicht den bereits vermuteten Effekt, dass eine deutlich höhere Faserwinkelabweichung in den ersten 10mm des Preforms vorliegt. Im weiteren Verlauf liegt die Faserwinkelabweichung mit 0° bis 8° deutlich unter dem Wert von 20° in einem Bereich. Aufgrund dieser Tatsache liegt der erste Messpunkt für die Aufnahme mit dem Digitalmikroskop erst bei 40mm, um diesen Effekt in der Auswertung der eigentlichen Schnittversuche auszuschließen.

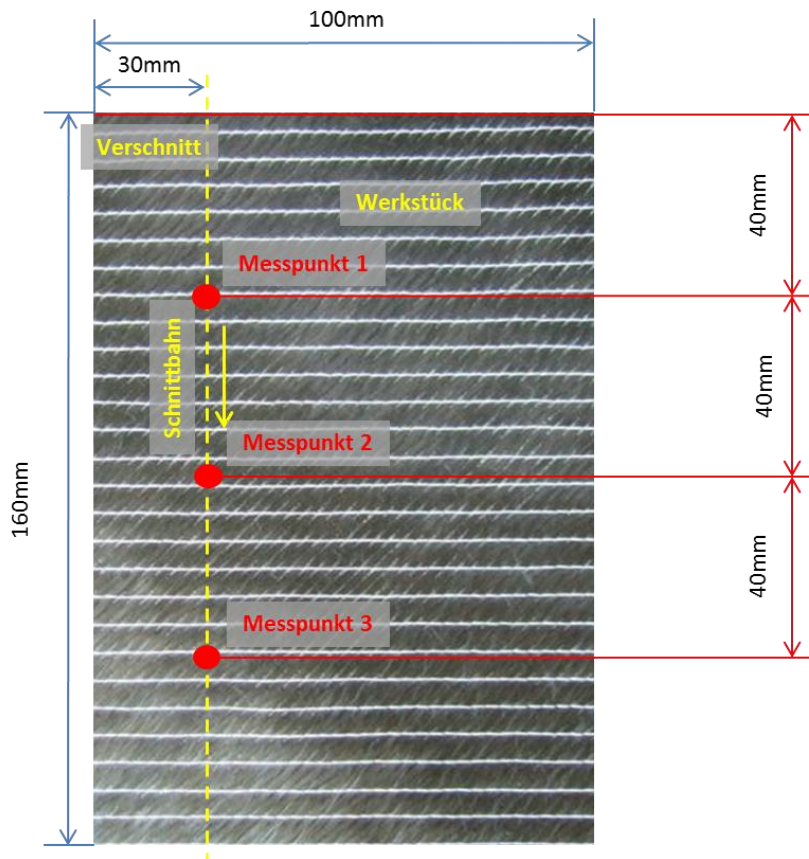


Abbildung 26: Messpunkte des Versuchspreforms

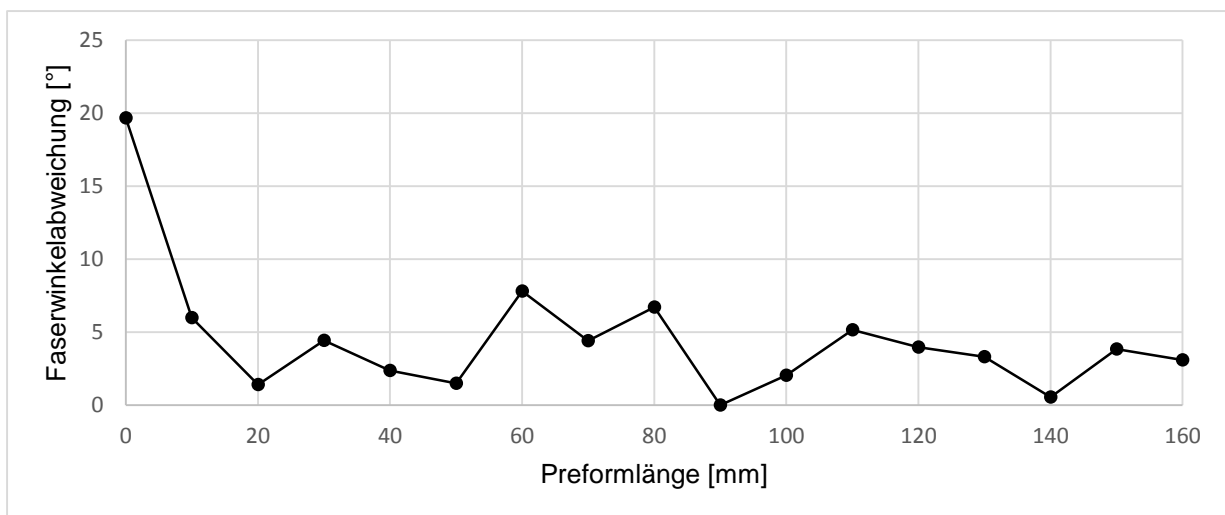


Abbildung 27: Verlauf der Faserorientierung über die Länge des Preforms

Die Schnittqualität wird nach dem Trennprozess durch die Winkelabweichung δ , welche aus der Faserorientierung an der Schnittkante im Bezug zur Ausgangsorientierung resultiert, definiert, vgl. Abbildung 28.

In Vorversuchen stellte sich heraus, dass die oberste Faserlage nicht an der Schnittkante geschnitten wird, sondern ein Versatz x aufweist. Für dieses weitere Kriterium der Schnittqualität wird der Abstand x zwischen der eigentlichen Schnittkante zur Schnittkante

der obersten Faserlage gemessen, siehe Abbildung 28. Die Ursachen für den Versatz der beiden Schnittkanten wird in Kapitel 5.8 näher untersucht.

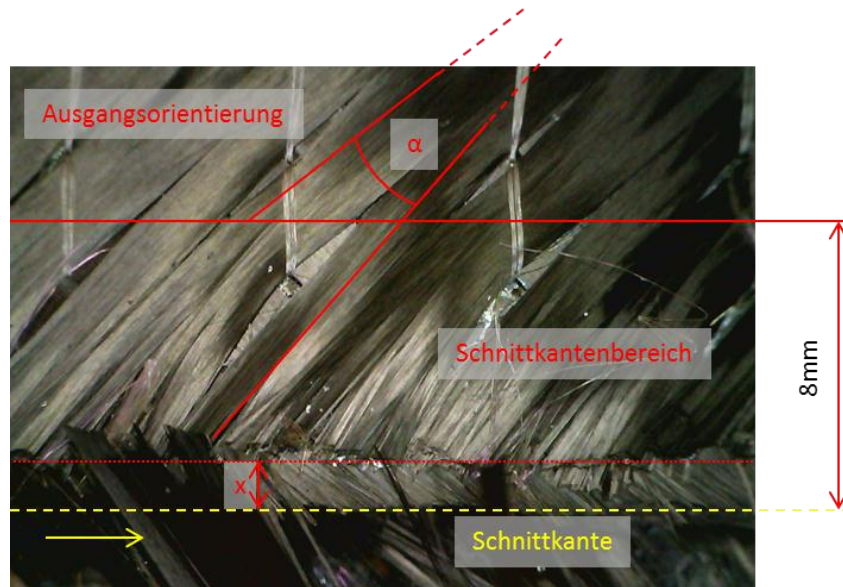


Abbildung 28: Prinzip zur Ermittlung der Schnittqualität nach dem Trennen

5.6 Versuch: Schneidwinkel

Im ersten Versuch soll ein Schneidwinkel ermittelt werden, welcher den Preform zuverlässig durchtrennt, und gleichzeitig eine hohe Schnittqualität erzeugt.

5.6.1 Vorgehen bei der Schneidwinkeluntersuchung

Es werden in diesen Versuchen fünf verschiedene Schneidwinkel miteinander verglichen, wobei für jeden Schneidwinkel jeweils zwei Preforms geschnitten werden, um die Reproduzierbarkeit des Ergebnisses zu prüfen und eventuelle Messfehler abzufangen. Aufgrund der Messergeometrie ist der Schneidwinkel bei 30° nach unten begrenzt, da die Länge der Klinge für diesen Preform sonst zu kurz ist. Untersucht werden bei einer konstanten Amplitude von 100% die Winkel Λ : 50°, 45°, 40°, 35° und 30°. Die Messervorschubgeschwindigkeit ist mit 80mm/s konstant.

5.6.2 Auswertung der Schneidwinkeluntersuchung

Die Schneidwinkeluntersuchungen zeigen, dass sich mit sinkendem Schneidwinkel die Qualität der Schnittkante signifikant verbessern lässt. Je nach Schnittwinkel ist eine starke Veränderung der Faserorientierung im Schnittkantenbereich vor und nach dem Schnitt zu erkennen. Aus dem linken Bild in Abbildung 29 wird ersichtlich, dass bei einem Schneidwinkel von 50° die Fasern in ihrer Orientierung so stark verändert werden, dass die Kettfäden im Bereich der Schnittkante reißen und die Fasern der obersten Lage nur lose aufliegen. In Abbildung 30 ist zudem zu erkennen, dass bei Winkeln über 40° die Schnittkante sehr stark ausgefranst und einzelne Fasern nicht durchtrennt werden. Ein nachträgliches Trennen dieser Fasern kann aufgrund der fehlenden Fixierung durch den nicht vorhandenen Faserverbund nicht zuverlässig vorhergesagt werden.

Ab einem Schneidwinkel von 35° und kleiner zeigt der Versuchspreform hingegen eine sehr qualitative Schnittkante ohne Ausfransungen, welches aus dem rechten Bild in Abbildung

30 ersichtlich wird. Auch die Faserorientierung an der Schnittkante ändert sich nicht signifikant zur Ausgangsorientierung.

In Abbildung 31 ist zu erkennen, dass mit sinkendem Schneidwinkel sich die Faserabweichung im Schnittkantenbereich stark reduziert. Ab einem Schneidwinkel von 40° ändert sich die gemessene Schnittqualität nur gering, jedoch zeigten die Versuche mit $\Lambda=40^\circ$ leichte Ausfransungen der Schnittkante auf.



Abbildung 29: Geschnittene Preforms und deren Verschnitt

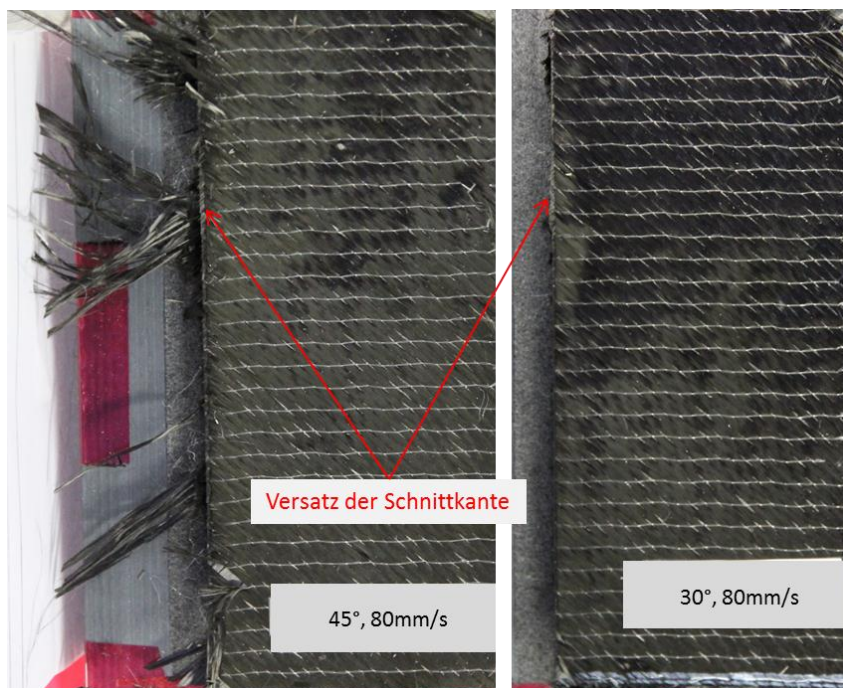


Abbildung 30: Starke Ausfransungen bei 45° im Vergleich zu 30°

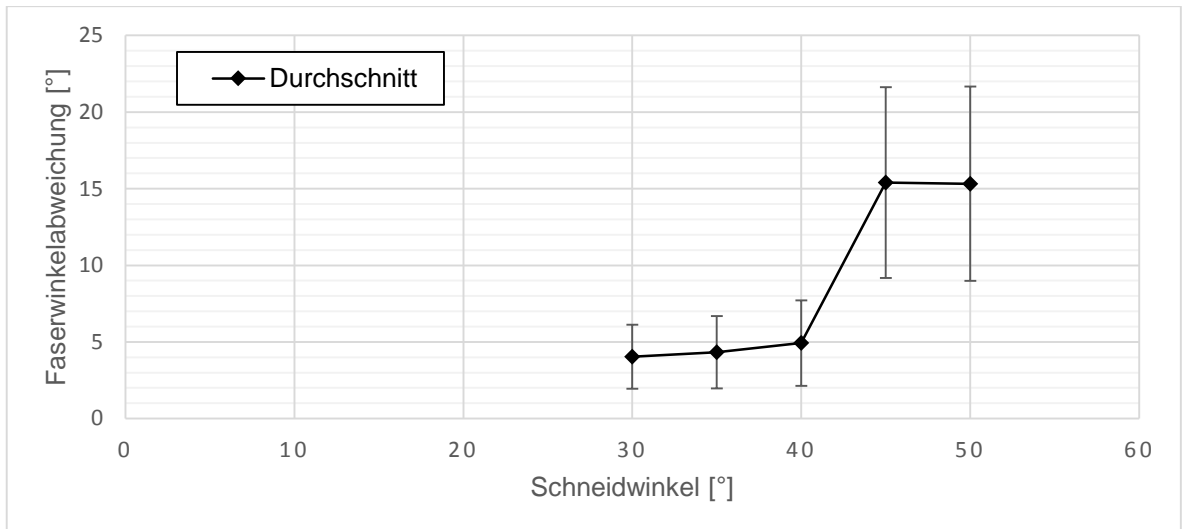


Abbildung 31: Einfluss des Schneidwinkels auf die Faserabweichung

Des Weiteren wird bei allen Schneidwinkeln festgestellt, dass die oberste Faserlage versetzt zur eigentlichen Schnittkante geschnitten ist. Mit sinkendem Schneidwinkel wird die Länge des Versatzes um bis zu 0,6mm reduziert.

Wird der Versatz der Schneidkante der obersten Lage zur eigentlichen Schneidkante betrachtet, ist ein ähnlicher Verlauf, wie bei der Faserwinkelabweichung zu erkennen, vgl. Abbildung 31 und Abbildung 32. Auch hier reduziert sich messbar die Länge des Versatzes mit sinkendem Schneidwinkel.

Für die einzelnen Messreihen wurde die Standardabweichung bestimmt. Auffällig ist eine hohe Standardabweichung bei 50° und 45°. Die Ursache ist eine starke Ausfransung der Schnittkante, die Ordnung der Faser wird teils komplett zerstört und es entstehen größere Schwankungen in den Messergebnissen.

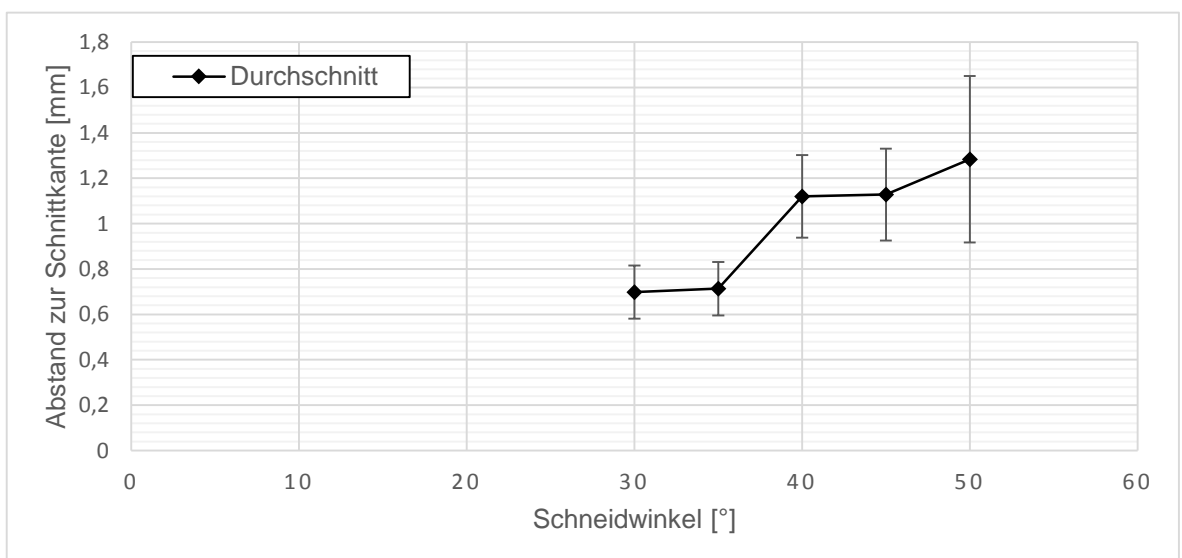


Abbildung 32: Einfluss des Schneidwinkels auf den Schnittkantenversatz

Sehr auffällig bei allen Schnittergebnissen war das Fehlerbild am Schnittbeginn, hier wurden am Anfang die Fasern der untersten Lage nicht geschnitten. Dieses Fehlerbild wird in Kapitel 5.9 weiter untersucht und erläutert.

5.7 Versuch: Vorschubgeschwindigkeit

Mit der Erkenntnis, dass das beste Schnittergebnis mit einem Schneidwinkel von 30° erzielt wird, wird in der folgenden Versuchsreihe der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Schnittqualität untersucht.

5.7.1 Vorgehen bei der Vorschubgeschwindigkeitsuntersuchung

Es werden insgesamt sieben verschiedene Geschwindigkeiten untersucht. Mit jeder Vorschubgeschwindigkeit werden wieder zwei Preforms geschnitten, um die Reproduzierbarkeit zu überprüfen.

Untersucht werden bei einem Schneidwinkel von 30° und einer Amplitude von 100% die Geschwindigkeiten: 30mm/s, 80mm/s, 150mm/s, 200mm/s, 250mm/s, 300mm/s und 400mm/s.

5.7.2 Auswertung der Vorschubgeschwindigkeitsuntersuchung

Die Untersuchungen zeigen, dass der Einfluss der Geschwindigkeit ab 80mm/s im Vergleich zum Einfluss des Schneidwinkels nur sehr gering ist. Durch die freijugige Bewertung ist kein signifikanter Unterschied zu erkennen, siehe Abbildung 33.

Die Schnittqualität schwankt um einen kleinen Bereich, dabei ist keine Verbesserung oder Verschlechterung, in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit, in eine bestimmte Richtung zu erkennen. Die geringe Schwankung der Schnittqualität kann auf eine nicht konstant gleiche Beschaffenheit des Versuchspreforms zurückgeführt werden. Schwankungen in der Qualität des Preforms entstehen im Prozess der Konsolidierung. In Abbildung 33 ist eine solche Qualitätsschwankung im mittleren Preform zu erkennen, bei diesem wurde durch einen zu hohen Wärmeeintrag während der Konsolidierung der Binder und die Kettfäden mittig beschädigt.

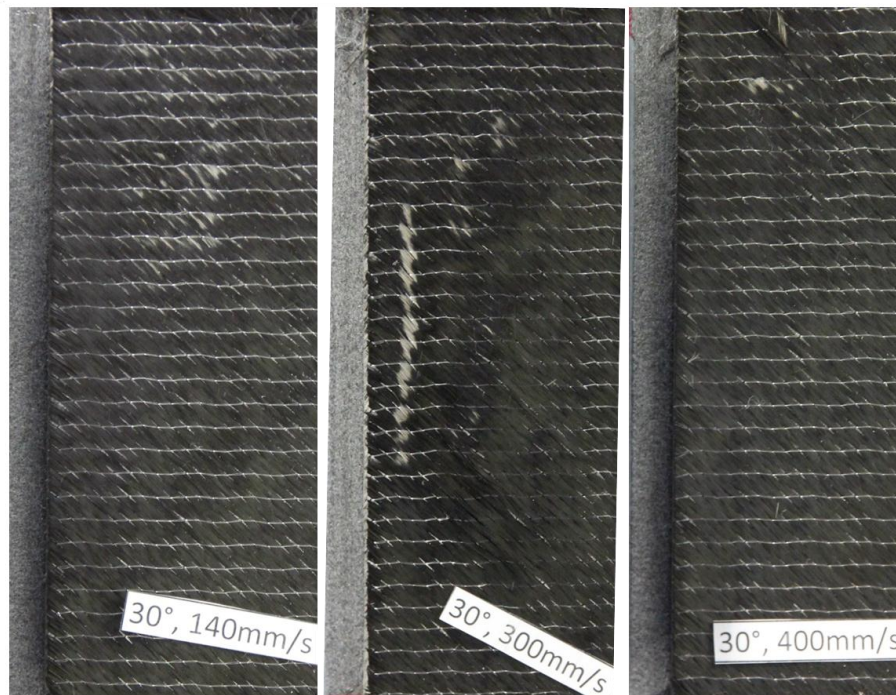


Abbildung 33: Schnittkanten bei (v.l.n.r.) 140mm/s, 300mm/s und 400mm/s

Eine Ausnahme ist der Schnitt mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 30mm/s, hier ist direkt vor der Schneide ein Aufbäumen des Textils zu beobachten. Die durch das Aufbäumen erzeugte Verschiebung der Fasern im Schnittkantenbereich ist so stark, dass die Kettfäden der obersten Gelelage aufplatzen und die Faser danach nur lose aufliegen und keiner Struktur mehr folgen. Besonders im Schnittanfang ist dieses Phänomen sehr stark ausgeprägt, siehe Abbildung 34.

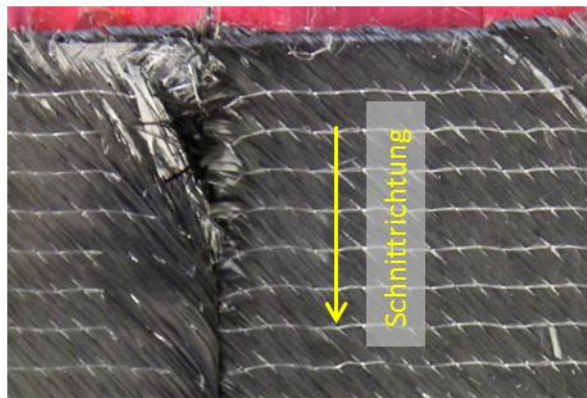


Abbildung 34: Zerstörung der Faserorientierung bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 30mm/s im Schnittanfang

Die Auswertung des Digitalmikroskops ist in Abbildung 35 und Abbildung 36 dargestellt. Im Diagramm aus Abbildung 36 wurde der Messpunkt bei 30mm/s nicht eingetragen. Die Faserorientierung war hier so gestört und unregelmäßig, dass eine Messung nicht möglich war. Dies wird durch die hohe Standardabweichung in diesem Messpunkt in Abbildung 35 nochmals unterstrichen.

Deutlich in beiden Diagrammen ist ein geringer Anstieg bei 200mm/s und 300mm/s zu erkennen. Hier spiegelt sich der Zusammenhang zwischen Faserabweichung und dem Schnittkantenversatz wieder. Je größer die Abweichung der Faser ist, desto größer ist auch die Länge des Schnittkantenversatzes. Da die Vorschubgeschwindigkeit keinen signifikanten Einfluss auf die Schnittkantenqualität hat, wird zwischen 80mm/s bis 400mm/s ein ansatzweise ebener Verlauf erwartet. Die beiden Ausschläge bei 200mm/s und 300mm/s in den Diagrammen weisen wie vorweg schon erwähnt auf schlecht konsolidierte Prefroms hin.

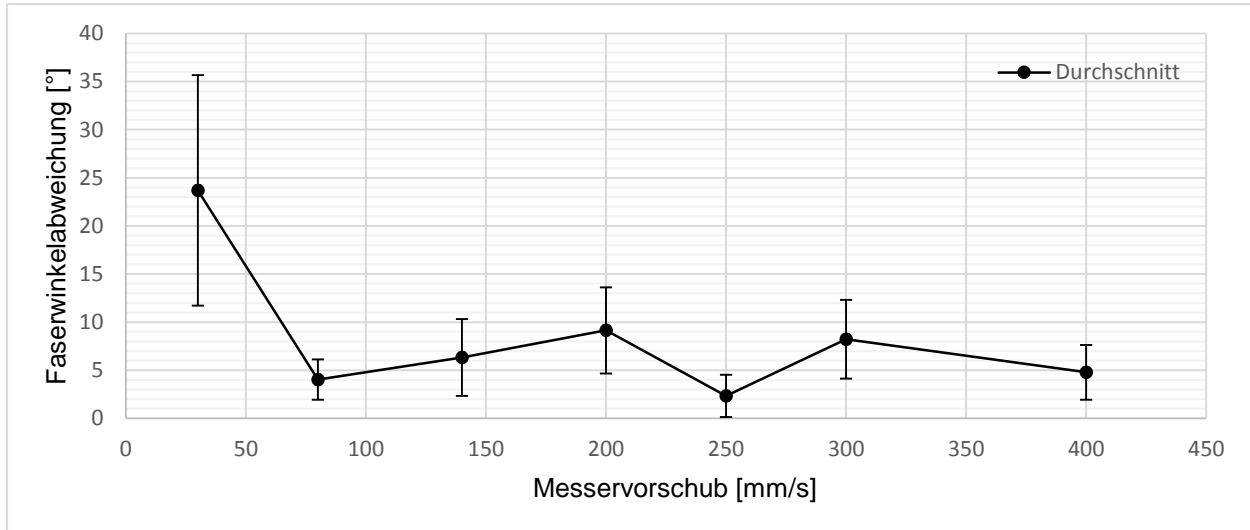


Abbildung 35: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Faserwinkelabweichung

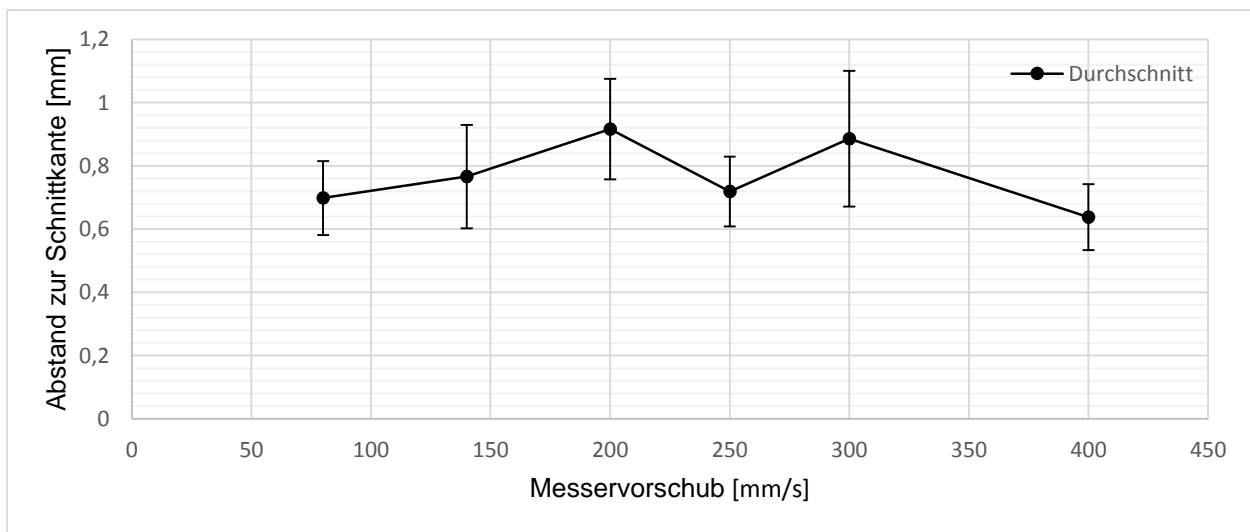


Abbildung 36: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf den Schnittkantenversatz

5.8 Ursache des Schnittkantenversatzes der obersten Faserlage zur eigentlichen Schnittkante

Bei allen Schneidversuchen wurde festgestellt, dass die oberste Gelepelage versetzt zur eigentlichen Schnittkante geschnitten wird. Die Ursache hierfür ist, dass die schlecht fixierten Fasern der obersten Gelepelage sich vor dem Messer herschieben bevor sie geschnitten werden.

Um dieses Phänomen anschaulich zu machen, wurde das Messer während des Schnittes gestoppt und die Faserorientierung mit dem Digitalmikroskop dokumentiert (Abbildung 37). Hier ist deutlich zu erkennen, dass auf der einen Seite des Messers die Faser unter starker Zugspannung steht und auf der anderen Seite sich die Faser aufbäumt und gegen das Messer drückt. Durch die Verschiebung der Fasern werden diese jetzt nicht mehr an der richtigen Position getrennt. Drückende Fasern werden beim Schneidprozess zu kurz abgeschnitten, ziehende Fasern werden zu lang abgeschnitten. Nach dem Schneiden fallen die Fasern zurück in Richtung ihrer Ausgangsorientierung. Jetzt ist ein deutlicher Versatz der Schnittkante der obersten Faserlage zu den unteren Faserlagen zu erkennen, welche an der richtigen Position getrennt wurden.

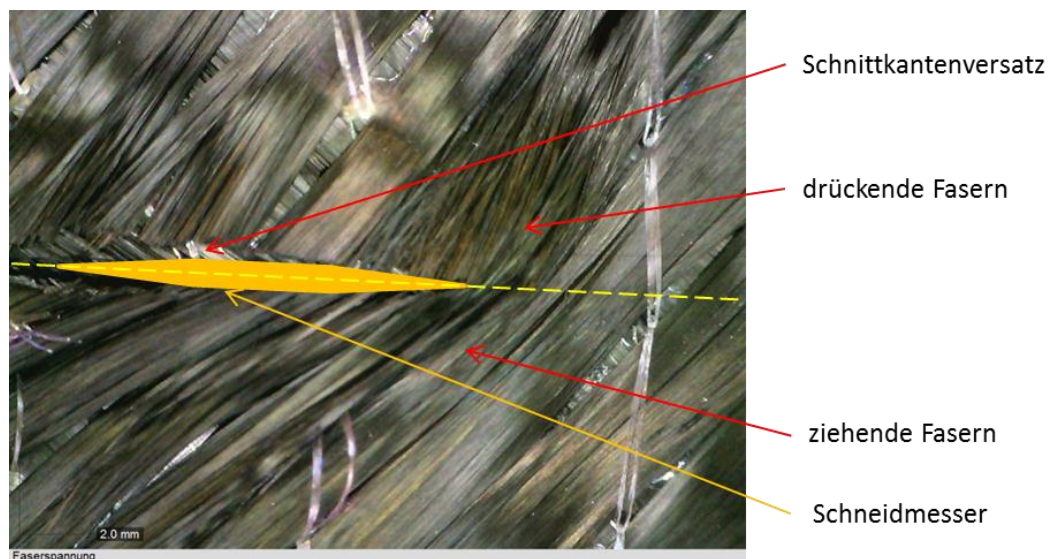


Abbildung 37: Faserverschiebung durch das Schneidmesser als Ursache für den Kantenversatz

Wie in den Versuchen aus 5.6.2 und 5.7.2 herausgefunden, kann der Schnittkantenversatz der obersten Faserlage zu den unteren Faserlagen nur durch einen größeren Sonotrodenanstellwinkel signifikant verringert werden.

5.9 Ungeschnittene und fehlerhafte Fasern am Schnittanfang

Bei den Schneidwinkel- und Vorschubgeschwindigkeitsversuchen konnte beobachtet werden, dass am Anfang jeden Schnittes in der untersten Lage in den ersten 5mm nicht geschnitten wurde.

Die Ursache ist bei der Betrachtung der Faserfixierung am Preformanfang zu finden und in Abbildung 38 dargestellt. Die Faserenden werden hier nur durch wenige Kettfäden gehalten und lassen sich leicht aus ihrer Struktur herausziehen. Dringt das Ultraschallmesser ein, wird die Faser vom Messer nicht geschnitten, sondern vor der Schneide hergeschoben. Dabei wird die Faser aus der Schlaufe der Kettfäden herausgezogen und verrutscht parallel

auf eine Seite vom Messer und kann nicht mehr getrennt werden. Sobald das Messer weg ist springt die Faser wieder zurück auf ihre Ausgangsposition. Dieses Fehlerbild ist bei einem Schnitt 0° zum Kettfaden nicht zu beobachten.

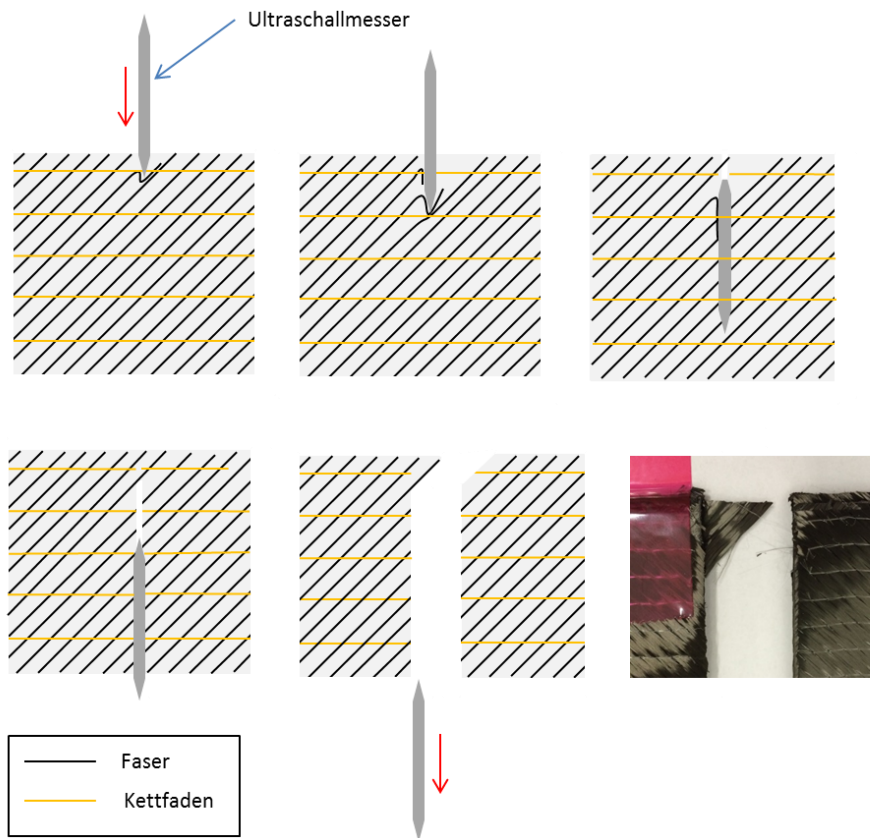


Abbildung 38: Fehlerbild am Schnittanfang in der untersten Faserlage

5.10 Versuch: Ultraschallamplitude

Die einzige Einstellmöglichkeit am Ultraschallgenerator ist die Amplitude der Schwingung. Die eingestellte Amplitude bestimmt die Verfahr­länge des Schneidmessers bei der Sägebewegung. Im folgendem wird der Einfluss der Amplitude auf das Schnittergebnis untersucht.

5.10.1 Vorgehen bei der Ultraschallamplitudenuntersuchung

Der Ultraschallgenerator erlaubt es nur die Amplitude prozentual in einem Bereich von 50%-100% zu verstellen. Für die Versuchsreihe werden Preforms mit einer Amplitude von 50%, 60%, 70%, 80%, 90% und 100% unter einem Sonotrodenanstellwinkel von 30° und einer Vorschubgeschwindigkeit von 300mm/s geschnitten.

5.10.2 Auswertung der Ultraschallamplitudenuntersuchung

Die Schnittergebnisse der Amplitudenversuche sind sehr eindeutig. Bei Amplitudeneinstellungen von 50% und 60% wurden die untersten zwei Lagen des Preforms nicht geschnitten. Hier war zu beobachten, dass beim Schneiden der Schneid­

ungewöhnlich vibriert. Diese Vibration wurde von den nichtdurchtrennten Fasern der untersten Lagen hervorgerufen, da diese beim Schneidprozess das Messer unterwanderten. Bei einer Einstellung von 70% ist die unterste Lage des Geleges teilweise nicht geschnitten. Ab Amplituden von 80% wird der gesamte Preform durchtrennt, dabei ist kein Unterschied in der Schnittqualität zwischen 80% -100% zu erkennen.

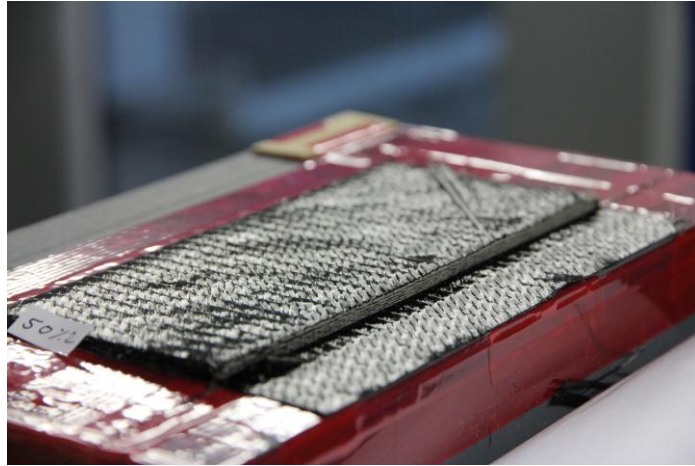


Abbildung 39: Ungeschnittene Gelege-Lagen bei einer Amplitude von 50%

Tabelle 4: Ergebnisse der Amplitudeneinstellung

Amplitudeneinstellung	50%	60%	70%	80%	90%	100 %
Amplitude [μm]	Keine Herstellerangabe	Keine Herstellerangabe	Keine Herstellerangabe	12	13	15
Ergebnis	Untersten 3 Lagen nicht geschnitten	Untersten 3 Lagen nicht geschnitten	Unterste Lage nicht geschnitten	ja	ja	ja

5.11 Versuch: Übertragung der Schnittergebnisse auf triaxiale und unidirektionale Gelege

In den vorangegangenen Versuchen wurden nur Preforms mit einem Aufbau aus biaxialen Gelege geschnitten und untersucht. Der Preform, welcher in der EVo-Projektanlage herstellt wird, besteht aber auch zu Teilen aus Unidirektional- und Triaxialgelegen. Daher ist es wichtig zu prüfen, ob die bereits gewonnenen Ergebnisse auf diese Gelegetypen übertragbar sind.

5.11.1 Vorgehen bei Schneidversuchen an triaxialen und unidirektionalen Gelegen

Um die Übertragbarkeit zu überprüfen werden vier verschiedene Versuche durchgeführt. Es werden Triaxialgelege mit der Faserausrichtung $+45^\circ/0^\circ/-45^\circ$ und $-45^\circ/90^\circ/+45^\circ$, sowie Unidirektionalgelege mit einer Ausrichtung 90° und 0° geschnitten. Die Versuchsproben werden mit einem Schneidwinkel von 30° , einer Vorschubgeschwindigkeit von 250mm/s und einer Amplitudeneinstellung von 100% geschnitten.

5.11.2 Auswertung der Schnittversuche an triaxialen und unidirektionalen Gelegen

Triaxialgelege

Als erstes wurden die beiden Triaxial-Preforms geschnitten. Auffällig bei dem Preform mit dem Gelege $-45^\circ/90^\circ/+45^\circ$ ist, dass am Schnittende die letzten Rovings der 90° Lage nicht geschnitten werden, sondern aus dem Preform gezogen werden (Abbildung 40). Dies wird eine ähnliche Ursache haben, wie schon in 5.9 beschrieben. Die 90° Fasern am Ende des Preforms werden nicht mehr ausreichend fixiert und werden vor dem Messer hergeschoben und nicht geschnitten.



Abbildung 40: Ausfransungen am Schnittende der 90° Faser

Desweiterem wurde der $-45^\circ/90^\circ/+45^\circ$ Triaxial-Preform nur in den obersten Lagen geschnitten, sodass der Verschnitt nicht abnehmenbar ist ohne den Preform zu schädigen. Hier war der erste Verdacht auf ein verschlissenes Messer, um dies zu prüfen wurde ein weiter Preform mit gleichen Parametern und einem biaxialem Aufbau geschnitten. Dieser Preform zeigte nach dem Schneiden eine hohe Schnittkantenqualität auf, sodass ein stumpfes Messer ausgeschlossen werden kann.

Im Vergleich zum $-45^\circ/90^\circ/+45^\circ$ Triaxial-Preform zeigte der $+45^\circ/0^\circ/-45^\circ$ Aufbau ein sehr gutes Schneidergebnis (vgl. Abbildung 41). Hier traten keine Ausfransungen der Faser auf, das Schnittergebnis kann mit der guten Schnittkantenqualität der biaxialen Preformaufbauten aus den Versuchen vorher verglichen werden. Die Auswertung mit dem Digitalmikroskop ergab eine durchschnittliche Faserwinkelabweichung von $4,1^\circ$ und einen Schnittkantenversatz von 0,69mm.



Abbildung 41: Vergleich der Triax-Preform Schnittversuche (l. $+45^\circ/90^\circ/-45^\circ$, r. $-45^\circ/0^\circ/+45^\circ$)

Unidirektionalgelege

Ein Preform mit einem unidirektionalen Gelegeaufbau unterscheidet sich deutlich zu den vorher untersuchten Multiaxialgelege-Preforms. Besonders fällt auf, dass bei diesem Preform die einzelnen Lagen nur schwach kompaktiert sind und die Fasern dadurch nur eine geringe Fixierung aufweisen. Wie schon in den vorigen Kapiteln erkannt, verschlechtern mangelhaft fixierte Fasern das Schnittergebnis. Der unidirektionale Preform verhält sich beim Schneiden ähnlich wie der triaxiale Preform. Beim Schneiden einer 90° Faserausrichtung, also senkrecht zur Schneidrichtung, werden nur die obersten Lagen des Preforms geschnitten, die unteren Lagen unterwandern das Messer wie beim 90° Triaxial-Preform. Durch die schlechte Fixierung der Fasern wurden diese vom Messer erst in Schneidrichtung verschoben und dann erst getrennt. Dies hat zur Folge, dass sich immer mehr nicht geschnittene Fasern vor dem Messer aufstauen, sodass die Schneidkraft ansteigt. Die Schneidkraft wurde nach einer Schnittlänge von 12cm so groß, dass die Saugkraft des Schneidtisches nicht ausreichend war um den Preform weiterhin zu fixieren, sodass dieser durch das Messer vom Schneidtisch geschoben wurde.

Abbildung 42 zeigt das Schnittergebnis eines unidirektionalen Preforms mit einer 0° Faserausrichtung zur Schneidrichtung. Hier konnten bei den Versuchen ausreichend gute

Ergebnisse erzielt werden. Bei genauerer Betrachtung ist zu erkennen, dass die Schnittkante nicht exakt gerade verläuft, sondern eine Welligkeit aufweist. Schuld daran ist, dass die Fasern beim Schneiden parallel zum Messer laufen und deshalb zum größten Teil nur zur Seite geschoben werden statt geschnitten. Nachdem Schneiden formen sich die Fasern wieder in ihre Ausgangsposition, sodass die Schnittkante leicht wellig wird.



Abbildung 42: Schnittergebnis eines 0° Unidirektional-Preforms

5.12 Verifizierung der Ergebnisse auf ein anderes Schwingersystem und verschiedene Messer

Abschließend zu allen Versuchen wurde überprüft, ob sich die Ergebnisse der Schneidversuche auf andere Messertypen sowie ein anderes Schneidsystem übertragen lässt. Für die vorangegangenen Schneiduntersuchungen wurde immer die gleiche Sonotrode, sowie ein gleiches Messer, welches einen Spitzenwinkel von 60° aufweist, verwendet. Tabelle 5 zeigt die Schneidsystemkonfiguration für die folgenden Untersuchungen.

Tabelle 5: Versuchskonfiguration mit unterschiedlichen Messern und Schneidsonotrode

Artikelnummer				
Schneidsonotrode	Messer	Spitzenwinkel γ [°]	Schneidwinkel Λ [°]	Sonotrodenanstellwinkel α [°]
29910048	290036	60	30	30
29910048	290019	70	30	25
29910243	290037-04	38	30	41
29910243	290047	26	30	47

Die Schneidsonotroden unterscheiden sich nur in ihrer Geometrie, Resonanzfrequenz und Amplitude sind identisch. Pro Messer werden immer zwei Proben mit den gleichen Parametern geschnitten. Dabei werden alle Proben bei einem Schneidwinkel von 30° und einer Vorschubgeschwindigkeit von 250mm/s sowie einer Amplitude von $15\mu\text{m}$ geschnitten. Anschließend werden die Schneidergebnisse verglichen.

Abbildung 43 zeigt für jedes Messer die durchschnittliche Faserwinkelabweichung. Deutlich zu erkennen ist ein Abfall der Faserwinkelabweichung mit steigendem Spitzenwinkel des Messers. Dieses Ergebnis bestätigt die Theorie: Je kleiner der Spitzenwinkel ist, desto kleiner ist bei gleichbleibenden Schneidwinkel der Sonotrodenanstellwinkel. Dieser wiederum hat einen Einfluss auf die Schnittgeschwindigkeit. Wird die Schnittgeschwindigkeit exemplarisch für einen Spitzenwinkel von 26° und 70° bei einem Schneidwinkel von 30° berechnet, ist zu erkennen, dass im Gegensatz zum 70° Messer die Schnittgeschwindigkeit bei 26° Messer um circa 8% geringer ist. Infolge der geringeren Schnittgeschwindigkeit steigt die Schneidkraft und die Fasern werden mehr ausgelenkt.

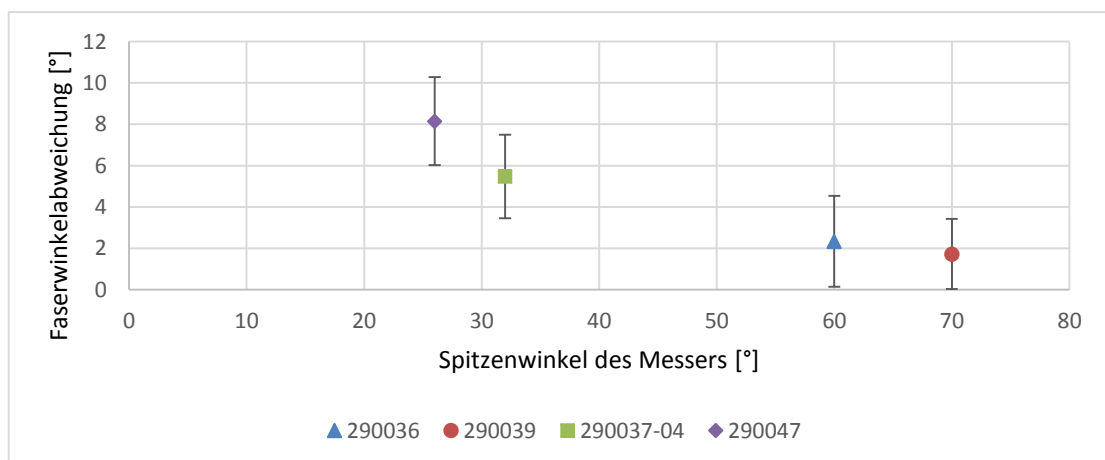


Abbildung 43: Faserwinkelabweichung in Abhängigkeit des Spitzenwinkels

Der Versatz der Schnittkante der obersten Faserlage ist für die jeweiligen Spitzenwinkel in Abbildung 44 dargestellt. Hier ist die Abhängigkeit des Spitzenwinkels nicht so ausgeprägt wie bei der Faserwinkelabweichung. Es ist keine eindeutige Tendenz in eine Richtung zu erkennen, da alle Werte nur sehr nah beieinander liegen. Aufgrund des etwas geringen Wertes bei Messer 290019 kann vermutet werden, dass auch hier mit steigendem Spitzenwinkel der Versatz der Schnittkanten kleiner wird.

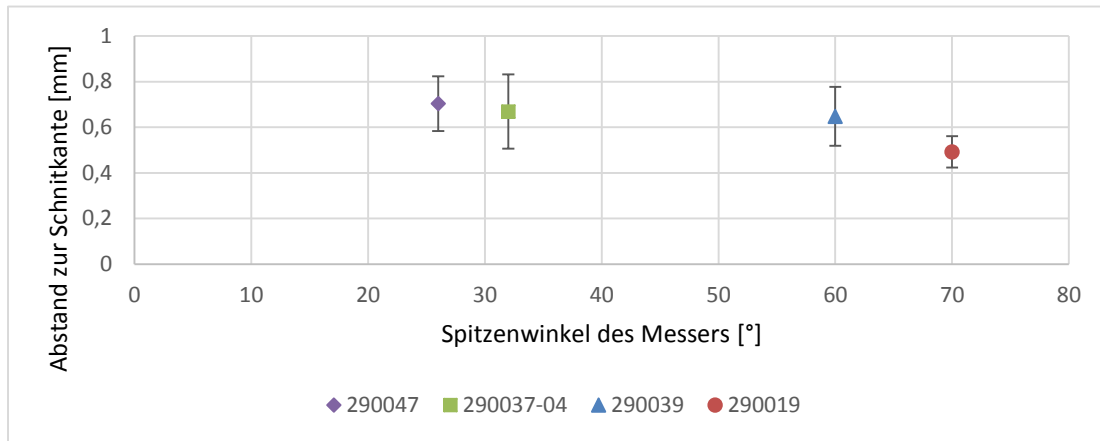


Abbildung 44: Versatz der Schnittkante in Abhängigkeit des Spitzenwinkels

Zusammenfassend betrachtet kann gesagt werden, dass die Schnittergebnisse aus den vorangegangenen Versuchen auf andere Messer übertragbar sind. Die Schnittqualität ist bei beiden Sonotroden und allen Messern sehr gut, die Unterschiede in der Faserwinkelabweichung sind in der Schwingrichtung der Sonotrode und die damit verbundene Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit begründet. Für das Schneiden von CFK Preforms sollte somit ein Messer mit großem Spitzenwinkel gewählt werden, damit die Sonotrode möglichst senkrecht zur Schneidrichtung steht und ein geringer Schneidwinkel vorliegt.

6 Anwendung der Schneidergebnisse auf den Feinbesäumungsprozess

In diesem Kapitel wird eine Strategie vorgestellt, damit die gewonnenen Schnittergebnisse auf den EVo Feinbesäumungsprozess übertragen werden können. In Abbildung 45 ist der Schneidablauf am Spant gezeigt, Tabelle 6 gibt für jede Schneidbahn die Bewegungsrichtung und den dazugehörigen Schneidwinkel an. Als Schneidmesser wird ein Messer mit einem Spitzenwinkel von 60° gewählt. Dieses Messer erzielte zwar nur die zweitbesten Schnittergebnisse, jedoch liegt dieser Messertyp in einer hohen Stückzahl im DLR vor.

Die Schneidstrategie wird in der Offline-Programmierung von Cenit simuliert. Hierbei wird geprüft, welche Schneidwinkel ohne eine Kollision mit dem Werkzeug realisierbar sind. Außerdem kann Anschließend daraus ein fertiges Roboterprogramm generiert werden.

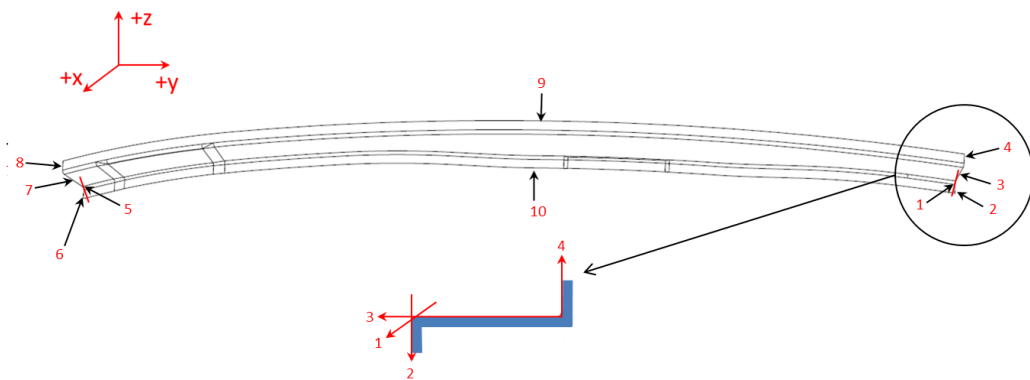


Abbildung 45: Schneidstrategie am EVo Spant

Tabelle 6: Schneidablaufplan am EVo-Spant

Bahn	Bearbeitungsrichtung	Λ [°]	Bahn	Bearbeitungsrichtung	Λ [°]
1	+x	35	6	-z	40
2	-z	45	7	+y	30
3	+ x	30	8	+z	30
4	+z	30	9	+y	30
5	+y	40	10	-y	30

Auf den kurzen Schneidbahnen hat der Roboter nur wenig Zeit zum Beschleunigen und wieder Abbremsen, deshalb können keine hohen Vorschubgeschwindigkeiten erreicht werden. In den Radien zwischen Bahn 2/3, 3/4, 6/7 und 7/8 müssen vom Roboter mehrere Achsen gleichzeitig bewegt werden, damit der Tool Center Point des Messers genau der Schneidlinie folgen kann. Das Problem dabei ist, dass die Achsen, welche weiter weg vom Endeffektor liegen, wie zum Beispiel die X-Achse vom Portal, teilweise große Strecken zurück legen müssen, obwohl sich das Messer nur wenige Millimeter bewegt. In Folge dessen müssen die Achsen welche näher am Endeffektor liegen ihre Geschwindigkeiten stark reduzieren, da ansonsten die Achsen, welche weiter weg vom Endeffektor liegen, ihre maximale Achsgeschwindigkeit überschreiten würden. Um die Reduzierung der Geschwindigkeit zu umgehen werden die Radien des Spantes nicht exakt mit dem Tool Center Point des Messers abgefahren. In den beiden Radien am äußeren Flansch sticht das Messer senkrecht und mittig in den Radius ein und folgt dann nur noch einer geraden Bahn. Dabei überschneiden sich jeweils die Schneidbewegungen von Bahn 3 und 4 sowie 7 und 8. Gleiche Überschneidungen sind auch an den beiden Radien am inneren Flansch zu finden. Besonderheit hierbei ist, dass auf beiden Seiten eine extra Bahnbewegung programmiert wurde, welche die Radien in der Mitte tangential schneidet. Die Zusatzbahn ist nötig, da durch die Schneidbewegung von Bahn 2 und 3 im Radius in den unteren Gelegelagen des Preforms die Fasern nicht durchtrennt werden.

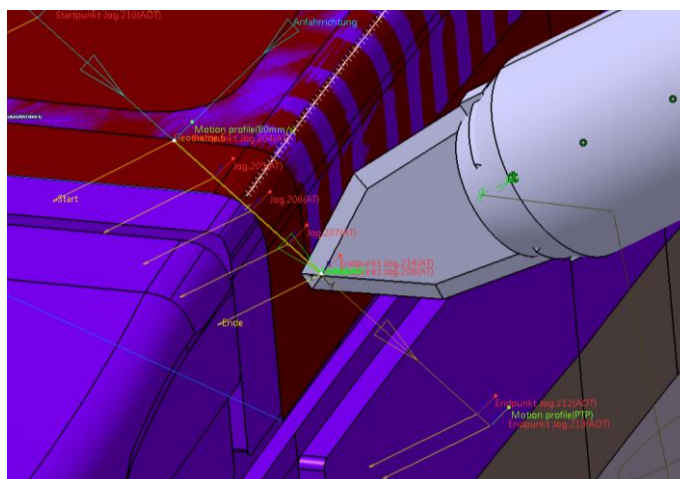


Abbildung 46: Tangentiale Schneidbahn in den Radien am inneren Flansch

Ein weiteres Problem bei der Feinbesäumung ist es die optimalen Schneidwinkel in den Randbereichen des Spantes zu realisieren. Besonders die in Abbildung 45 dargestellten Bahnen 1/2/5 und 6 können nicht mit einem gewünschten Schneidwinkel von 30° geschnitten werden, da in -z Richtung geschnitten werden muss und dabei der Endeffektor mit der Werkzeugaufnahme, wie in Abbildung 47 gezeigt, kollidieren würde. Die +z Richtung eignet sich nicht für den Schnitt, da das Messer bei der Schneidbewegung den Preform vom Werkzeug hebt. In der Offline-Programmierung zeigte sich, dass auf den Bahnen 1/2 ein minimaler Schneidwinkel von 45° und auf den Bahnen 5/6 ein minimaler Schneidwinkel von 40° ohne Kollision des Endeffektors mit der Werkzeugaufnahme realisieren lässt.

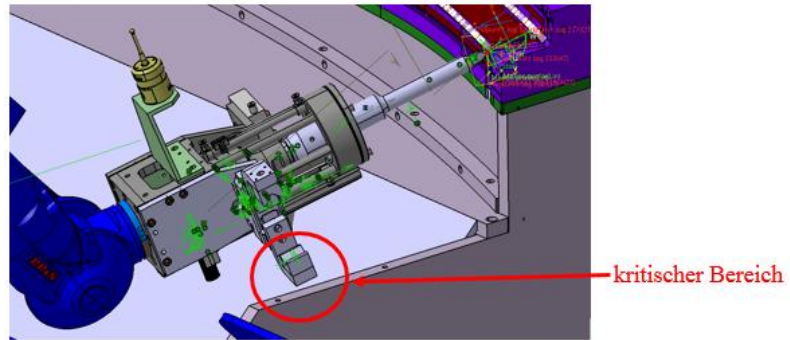


Abbildung 47: Kollisionsgefahr zwischen Endeffektor und Werkzeugaufnahme

7 Flächige Preformfixierung auf dem Feinbesäumungswerkzeug

Wie bereits in Kapitel 4 aufgeführt ist die Preformfixierung besonders am Innenflansch ein Problem. Durch die Eigensteifigkeit des Textils biegt sich der innere Flansch nach dem Konsolidieren wieder nach oben. Dies hat zur Folge, dass nach der Ablage des Preforms durch den Verkettungsroboter auf dem Feinbesäumungswerkzeug ein Spalt am inneren Flansch zwischen Werkzeug und Preform entsteht. Die vom Seitenkanalverdichter erzeugte Saugkraft ist nicht ausreichend um den inneren Flansch des Preforms an das Feinbesäumungswerkzeug zu saugen. Wird dieser Preform feinbesäumt entspricht dieser nicht mehr der geforderten Bauteilendkontur. Aufgabe ist es, den Preform vor dem Schneiden an das Werkzeug zu drücken und sicherzustellen, dass sich dieser anschließend wieder in der Soll-Position befindet.

Es wurden Überlegungen angestellt, wie der Preform so angedrückt werden kann, dass dieser durch die Saugwirkung am Feinbesäumungswerkzeug exakt fixiert wird. Hierfür wurde die Umsetzung einer Andrückrolle gewählt, welche vom Pneumatikgreifer am Endeffektor aufgenommen wird. Die Andrückrolle wird gefedert auf einer Linearschiene gelagert, damit diese Unebenheiten in der Preform ausgleichen kann und die damit verbundenen Stöße auf den Roboter abfängt. Außerdem steigt die Flexibilität der Andrückrolle durch eine gefederte Lagerung, da nur ein Roboterprogramm für unterschiedliche Preformdicken benötigt wird. Die Konstruktion und Umsetzung der Andrückrolle wird in Kapitel 7.1 genauer erläutert.

Eine weitere Idee wird in Kapitel 7.2 vorgestellt. Hier wird das bereits am Roboter implementierte Laserlichtschnittsystem verwendet, um zu prüfen, ob der Preform richtig am Feinbesäumungswerkzeug anliegt.

7.1 Konstruktiver Entwurf und Umsetzung einer Andrückrolle

Als Grundstein der Konstruktion wurde ein Lastenheft mit den Anforderungen der Andrückrolle aufgestellt.

- linear gelagert
- gefedert
- gute Erreichbarkeit des inneren und äußeren Flansches mit der Rolle
- Aufnahme durch Pneumatikgreifer

Die Konstruktion der Andrückrolle kann in drei Baugruppen unterteilt werden. Der Aufnahme für den Pneumatikgreifer mit einer Führungsschiene für die lineare Lagerung, dem Gleitschlitten und der Andrückrolle selbst. Für die Federung wird eine Gasdruckfeder mit einer Ausschubkraft von 20N und einem Hub von 108mm verwendet. Die Rolle ist über zwei Rillenkugellager auf einer Welle am Gleitschlitten gelagert. Bevor die Rolle produziert wird, wurde wie in Abbildung 48 gezeigt, in der CAD Umgebung geprüft, ob diese alle Bereiche des inneren und äußeren Flansches erreichen kann.

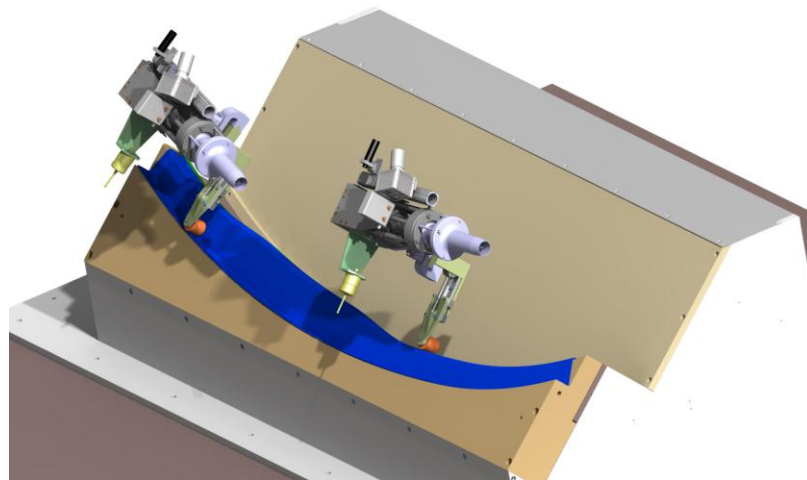


Abbildung 48: Überprüfung der Erreichbarkeit der Andrückrolle

Die Pneumatikgreiferaufnahme, die Rollenaufnahme sowie die Rolle wurden mittels eines 3D Druckers nach dem Stereolithographieverfahren gedruckt. Die Linearschienen sowie der Schlitten, die Gasdruckfeder und die Rillenkugellager wurden extern beschafft. Die fertig montierte Andrückrolle ist in Abbildung 49 dargestellt.

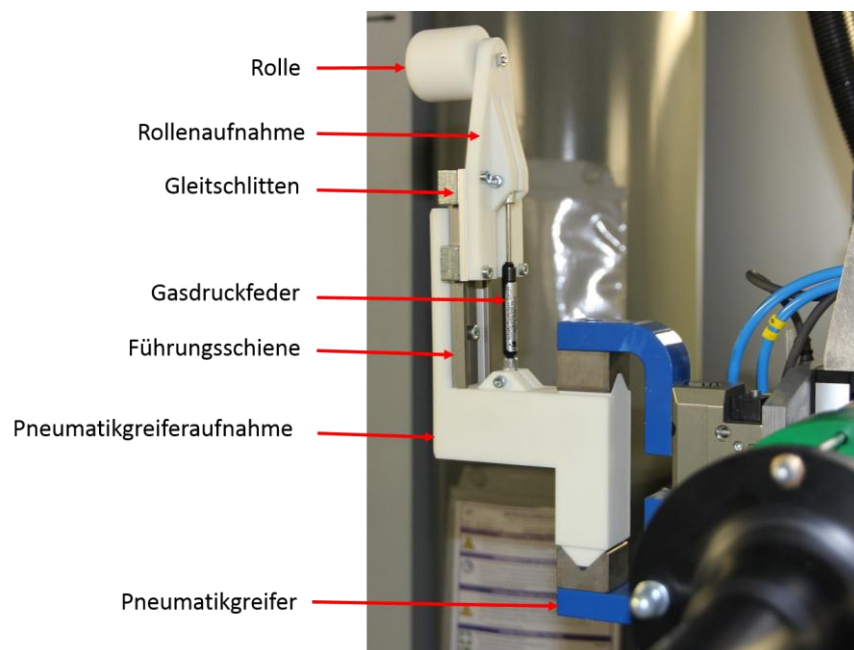


Abbildung 49: Montierte Andrückrolle

Damit für die Andrückrolle Roboterprogramme erstellt werden können, wird in der Offline-Programmierungsumgebung von Cenit und am Roboter ein Tool Centerpoint eingerichtet. Dieser befindet sich bei einem Gasdruckfederhub von 98mm an der Spitze der Rolle. Der Tool Center Point ist bewusst für eine gestauchte Feder gewählt, da bei einer vollständig entspannten Gasdruckfeder die Rolle nur in eine Richtung Unebenheiten ausgleichen könnte. Anschließend wurde mit dem neu eingerichteten Werkzeugpunkt ein Offline-Programm, welches mit der Andrückrolle den äußeren und inneren Flansch des Preforms abfährt, erstellt und auf den Feinbesäumungsroboter übertragen.

7.2 Überprüfung der Lage des Preform-Innenflansches durch einen Laserlichtschnittsensor

Die Grundüberlegung ist es, den Laserlichtschnittsensor zu nutzen, um zu überprüfen, ob der Preform vor dem Besäumen am Werkzeug anliegt. Das soll verhindern, dass ein fehlerhaft anliegender Preform geschnitten wird. Bei der Feststellung einer fehlerhaften Lage des Preforms können gegebenenfalls Nachbesserungen durch die Andrückrolle erfolgen.

Das Laserlichtschnittsystem ist bereits im DLR am Feinbesäumungsroboter erprobt, sodass Roboterprogramme zum Scannen und Matlab-Funktionen für die Auswertung vorhanden sind.

Um die Lage des Preforms überprüfen zu können, wird dieser auf dem Werkzeug liegend über die gesamte Länge gescannt. Dabei bewegt der Roboter die Laserlinie bei einer konstanten Geschwindigkeit über das Werkstück. Gleichzeitig zeichnet die CCD-Matrixkamera mit einer Frequenz von 33,33Hz die Lage der Laserlinie auf. Dies ergibt über die gesamte Preformlänge 332 aufgenommene Querschnitte. Die Querschnitte werden anschließend durch einen Computer mit gescannten Querschnitten eines leeren Werkzeuges verglichen. Liegen die aufgenommenen Punktreihen vom Preform und leeren Werkzeug in einem Abstand parallel zu einander, liegt der Preform am Werkzeug an. Besteht ein Winkel zwischen den beiden Punktreihen steht dieser vom Werkzeug ab.

Da die Kamera nur einen eingeschränkten Aufnahmebereich hat, kann der Preform nicht mit einer einzigen Aufnahme komplett erfasst werden. Deshalb werden für die Überprüfungen, wie in Abbildung 50 gezeigt, zwei Scans erstellt, jeweils einen für den inneren und für den äußeren Flansch.

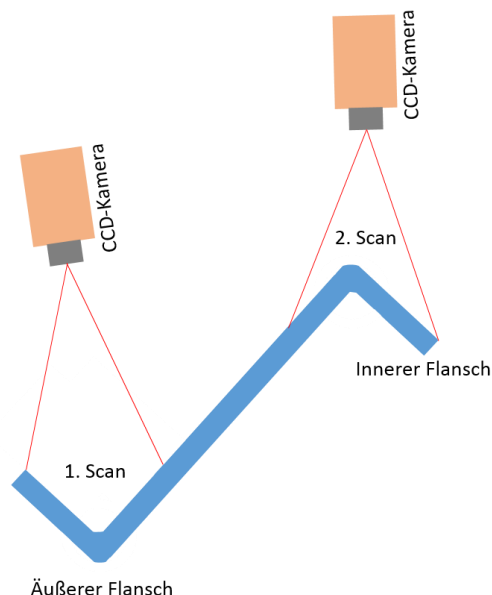


Abbildung 50: Scan-Bereiche

Für die Aufnahme der Messdaten vom Kamerasensor wird die Software CX Explorer verwendet. Der CX Explorer schreibt die Messdaten als 3D-Punktwolke in eine .xyz-Datei. Dieses Datenformat beinhaltet die Koordinaten der einzelnen Messpunkte in

einem dreispaltigen Vektor (x, y, z) und kann mit gängigen Textprogrammen wie zum Beispiel Editor oder Notepad++ geöffnet werden. Somit ist eine optimale Kompatibilität mit MATLAB gegeben.

Zur Weiterverarbeitung werden die .xyz-Daten an ein Matlab Programm übergeben. In dem Matlab Programm werden als erstes die Daten aufbereitet. Dies ist nötig, da durch Reflexionen am Textil falsche Messwerte vom Kamerasensor aufgezeichnet wurden. Die fehlerhaften Punkte werden vom Programm erkannt und gelöscht. Des Weiteren wird die eingelesene Messdatei bereinigt, in dem identische Punkte, oder Punkte welche sich innerhalb eines definierten Bereiches befinden, gelöscht werden. Durch diesen Schritt wird die Rechenzeit deutlich reduziert. Für die Aufbereitung der Daten konnten vorhandene Matlab Funktionen verwendet werden, welche bereits erfolgreich bei der Auswertung von Messdaten des Laserlichtschnittsensors eingesetzt wurden.

Die aufbereiteten Daten werden nun genutzt um die Lage des Preformflansches in jedem Querschnitt festzustellen. Hierzu wurde eine Matlab-Funktion „CreatFitlin.m“ erstellt, welche den Flansch des leeren Werkzeuges sowie des Preformes erkennt und die dazugehörigen Messpunkte in den Zwischenspeicher schreibt. In diese Messpunkte wird mit Hilfe des Curve-Fitting-Tools von Matlab eine Ausgleichsgerade in den Flansch des leeren Werkzeuges und eine in den Flansch des Preforms gelegt. Die berechneten Funktionen der Ausgleichsgeraden, welche den Werkzeugflansch und den Preformflansch repräsentieren, werden anschließend wieder an das Hauptprogramm übergeben. Hier wird berechnet, ob die beiden Geraden parallel oder in einem Winkel zueinander stehen. Dabei kann angenommen werden, dass bei einem Winkel kleiner 15° der Preform am Werkzeug anliegt. Bei größeren Winkeln, steht der Preform vom Werkzeug ab, hier gibt das Programm eine Meldung aus. In der Meldung sind der Winkel und die Querschnittsnummer hinterlegt. Abschließend werden die Messpunkte und die Ausgleichsgeraden zu jedem Querschnitt visuell für den Benutzer dargestellt. Ein detailliertes Flussdiagramm zum Programmablauf ist im Anhang hinterlegt, das Auswerteprogramm ist auf der CD hinterlegt.

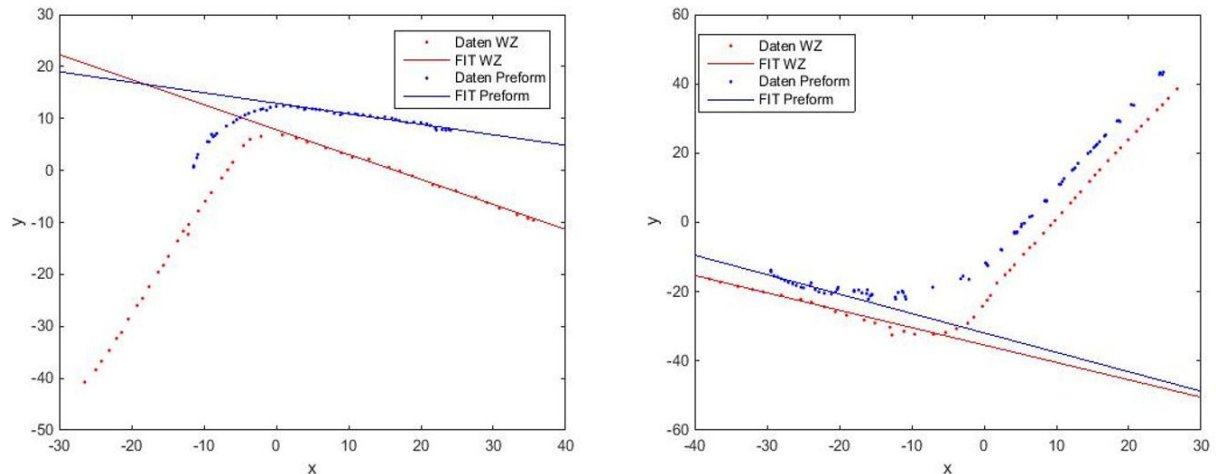


Abbildung 51: Preformlage am inneren (links) und äußerem (rechts) Flansch

Abbildung 51 zeigt das Ergebnis der Auswertung der Messdaten, dabei stellt die Farbe Blau den Preform und die Farbe Rot das Werkzeug dar. Im linken Graph ist deutlich zu erkennen, dass der Preform vom Werkzeug absteht. Der rechte Graph zeigt den äußeren Flansch, hier ist ersichtlich, dass der Preform nicht vollständig im Radius anliegt. Besonders auffällig im rechten Graf ist die Welligkeit der Messpunkte des Preforms. Diese Wellen in den Messpunkten werden durch Reflexionen am Textil hervorgerufen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die EVo-Projektanlage zeigt einen möglichen Weg zur Großserienfertigung von CFK-Bauteilen auf. Dabei spielt der Feinbesäumungsprozess des Preforms eine Schlüsselfunktion. Die EVo-Anlage mit der Feinbesäumung des Bauteils vor dem RTM-Prozess ist bisher die einzige ihrer Art und fungiert somit als Technologiedemonstrator für verschiedene Wirtschaftszweige wie der Luftfahrt- oder Automobilindustrie. Das stetig steigende Interesse an Faserverbundkunststoffen macht neue Fertigungsweisen unumgänglich. Dabei stehen vor allem geringe Taktzeiten und ein hoher Automatisierungsgrad bei gleichzeitig hohen qualitativen Erzeugnissen im Hauptfokus der Entwicklungen.

Um eine Optimierung des Feinbesäumungsprozesses vornehmen zu können, wurden in Kapitel 5 die Prozessparameter identifiziert und in Schneiduntersuchungen untersucht. Dabei ergab sich, dass der Schneidwinkel und die Schwingrichtung der Sonotrode maßgeblich die Schneidqualität beeinflussen. Um eine möglichst hohe Qualität der Schnittkante zu erzielen, sollte deshalb die Sonotrode möglichst senkrecht zum Textil stehen und ein Messer mit einem großen Spitzenwinkel verwendet werden, sodass der Schneidwinkel klein bleibt. Die Vorschubgeschwindigkeit zeigte im Gegensatz dazu nur einen geringen Einfluss.

Beim Vergleich der Amplitudeneinstellungen sollte der vom Hersteller zu Sonotrode vorgegebene Bereich von 80-100% eingehalten werden. Bei kleineren Amplituden wurde der Preform nicht vollständig getrennt.

Trotz optimaler Schneidparameter erwiesen sich Fasern aus triaxialen und unidirektionalen Gelegen, welche senkrecht zur Schneidrichtung stehen, als Problem. Diese wurden überwiegend nicht geschnitten oder ließen die Schneidkraft so stark ansteigen, dass der Preform vom Versuchstisch geschoben wurde.

Ein weiterer Punkt dieser Arbeit war es sicherzustellen, dass der Preform vor dem Schneidprozess richtig am Werkzeug anliegt. Dazu wurde eine Andrückrolle konstruiert und umgesetzt, welche vom Roboter gegriffen wird und den Spant an den Flanschseiten gegen das Werkzeug drückt. Anschließend wird die Position der Flanschseiten des Preforms mittels des Laserlichtschnittsensors überprüft. Die Auswertung der Messdaten des Laserlichtschnittsystems ermöglicht ein Matlab-Script. Hier wäre es in Zukunft eine Aufgabe, das Programm mit einer Benutzeroberfläche zu versehen und in die Anlagensteuerung zu implementieren.

Neben der Feinbesäumung des Preforms bietet die Konsolidierung erhebliches Optimierungspotenzial. Hier stellte sich bei der Produktion der Versuchsproben heraus, dass diese eine sehr schwankende Qualität aufweisen. Werden alle Preforms gleichmäßig konsolidiert und stärker kompaktiert, würde die Schnittqualität beim der Feinbesäumung deutlich steigen.

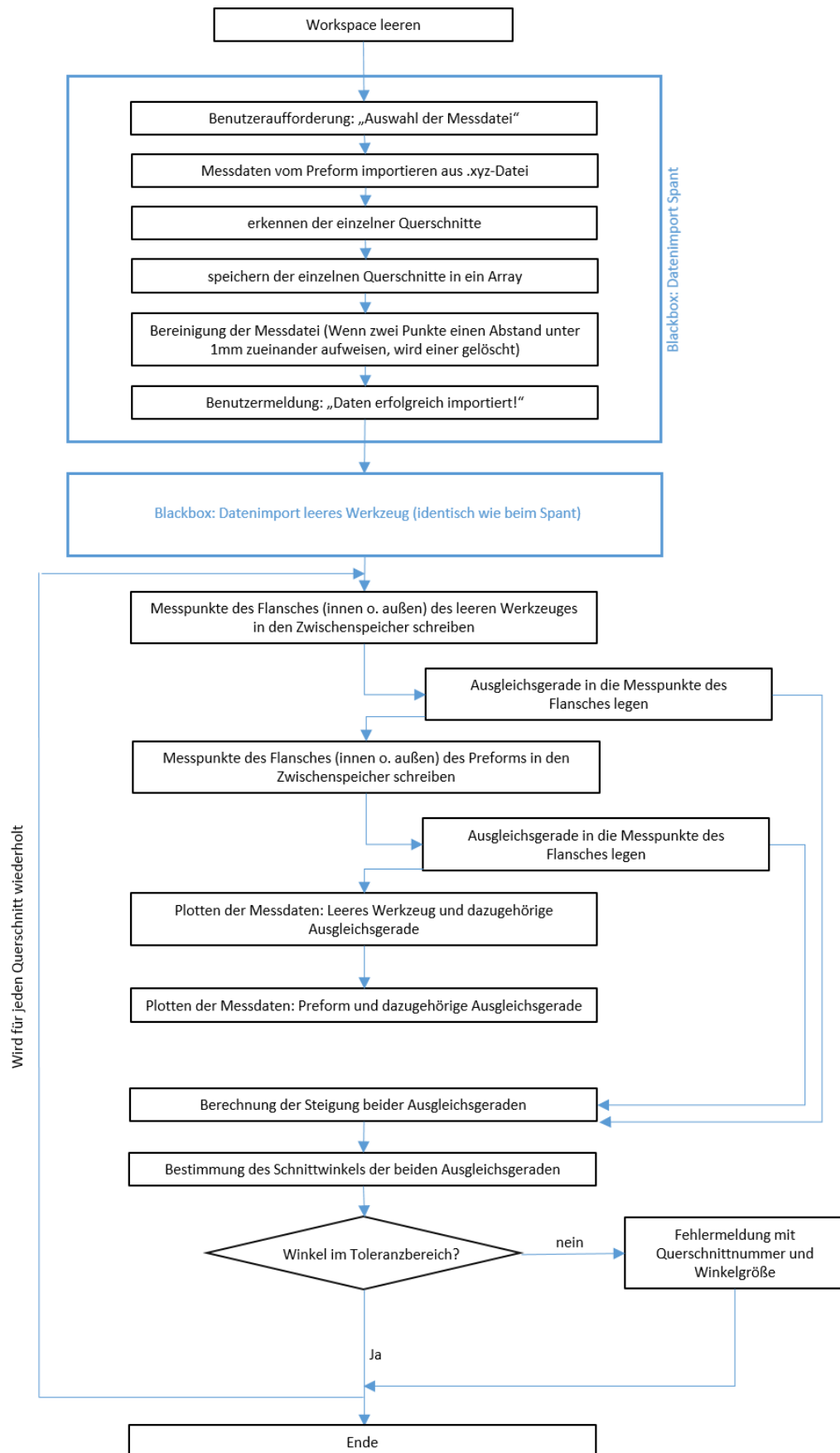
9 Literaturverzeichnis

- [1] M. Neitzel und P. Mitschang, Handbuch Verbundwerkstoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung, Hanser Verlag, 2004.
- [2] Flemming, Ziegmann und Roth, Faserverbundbauweisen - Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix, Springer Verlag, 1999.
- [3] USC Viterbi, „USC Viterbi M.C. Gill Composites Center,“ [Online]. Available: <http://composites.usc.edu/projects/automated-defect-evaluation-software-for-ultrasonic-ndi.htm>. [Zugriff am 16 06 2015].
- [4] Ch.Cherif, Textile Werkstoffe für den Leichtbau, Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften, Dresden: Springer-Verlag, 2011.
- [5] S. Torstrick, „Endkonturnahe Volumenbauteile (ZLP-EVo),“ Stade, 2014.
- [6] „Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik,“ [Online]. Available: http://www.dlr.de/fa/desktopdefault.aspx/tabid-7813/13307_read-33874/. [Zugriff am 17 03 2015].
- [7] AVK - Industrievereinigung Verstärkter Kunststoffe e.V. Hrsg., Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites, Grundlagen, Verarbeitung, Anwendung, Frankfurt am Main: Springer Vieweg, 2014.
- [8] W. Michaeli, Einführung in die Kunststoffverarbeitung, Aachen: Hanser, 2006.
- [9] W. Bruckner, „Ingenieur.de,“ 25 05 2012. [Online]. Available: <http://www.ingenieur.de/Themen/Kunststoffe/CFK-Hohe-Kosten-blockieren-Durchbruch-am-Massenmarkt>. [Zugriff am 30 06 2015].
- [10] H. Schürmann, Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Springer, 2007.
- [11] S. Tobias, Faserverbundtechnologie und Design - Das kleine 1x1 der Materialkunde, Berlin: TU Berlin, 2010.
- [12] W. Michaeli, „Kunststoffe.de,“ Hansa Verlag, [Online]. Available: https://www.kunststoffe.de/_storage/asset/702093/storage/chv-content-center/file/7853031/04326180.jpg. [Zugriff am 11 05 2015].
- [13] Gühring, „Guehring KG,“ 2012. [Online]. Available: http://www.guehring.de/pdf/CFK_Fraeser_2013.pdf. [Zugriff am 01 07 2015].
- [14] Reis GmbH, „Reis RLP-Laser,“ [Online]. Available: file:///C:/Users/hage_ch/Downloads/RLP-Laser_5213911.pdf. [Zugriff am 14 07 2015].

- [15] W. & N. L. König, „Bessere Schnittflächen mit Ultraschall,“ *Plastverarbeiter*, Nr. 37, pp. 47-50, 1986.
- [16] S. Zahn, „Ultraschallschneiden von Lebensmitteln,“ 2009. [Online]. Available: <http://d-nb.info/1007517557/34>. [Zugriff am 20 04 2015].
- [17] J. Wodara, Ultraschallfügen und -trennen, Magdeburg: DVS-Verlag GmbH, 2004.
- [18] CFN Centrum für Nanoanalytik, „Centrum für Nanoanalytik,“ [Online]. Available: <http://cfn.physik.uni-saarland.de/piezo.php>. [Zugriff am 2015 06 24].
- [19] S. Hesse und G. Schnell, Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation, Funktion - Ausführung - Anwendung, Vieweg+Teubner, 2011.
- [20] K. Haug, ISW Forschung und Praxis; Bd. 141: Laser-Lichtschnittsensorik für die, Jost-Jetter Verlag, 2001.
- [21] apodius GmbH, „apodius,“ apodius GmbH, 04 05 2015. [Online]. Available: www.apodius.de/de/produkte/. [Zugriff am 04 05 2015].
- [22] M. Cetin und T. Gries, „Expandierte Polystyrolmaterialien als Hilfsmittel zur Herstellung textiler Preforms,“ *lightweight design*, 01 2015.
- [23] Reis Robotics GmbH, „Dokumentation, Reis GmbH & CO Maschinenfabrik Obernburg“ 2013.
- [24] J. Roberz, „APODIUS Vision System,“ Apodius GmbH, Aachen, 2015.
- [25] Dino-Lite Europe, Dino-Lite Europe, [Online]. Available: <http://www.dino-lite.eu/images/example-pictures/applications/esd/esd-6.jpg>. [Zugriff am 26 06 2015].

10 Anhang

A1: Flussdiagramm zum LLS Auswerteprogramm



A2: Information zum Matlab-Auswerteprogramm

Die Hauptauswerteprogramme für den inneren und äußeren Flansch greifen auf Matlab-Funktionen zu, daher ist zwingend alle Matlab-Scripte im selben Verzeichnis zu speichern. Die Messdaten können beliebig gespeichert werden.

Programmordner LLS_Auswertung:

- *consolidator.m* (Funktion)
- *creatFitlin.m* (Funktion)
- *ismemberf.m* (Funktion)
- *LLS_Auswertung_aussen_Flansch.m* (Anwenderhauptprogramm)
- *LLS_Auswertung_innen_Flansch.m* (Anwenderhauptprogramm)

Messdatensätze:

- *leeres_WZ_aussen*
- *leeres_WZ_innen*
- *preform_aussen_flansch*
- *preform_innen_flansch*

Um eine Auswertung vornehmen zu können, muss ein Anwenderhauptprogramm über die Run-Schaltfläche in Matlab gestartet werden. Anschließend öffnen sich zwei Auswahlfenster nacheinander für die Messdaten. Nach der Auswahl der Messdaten startet die Auswertung automatisch.